



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TONI SIMOLIN
SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSJÄRJESTELMÄN JA
-KESKUKSEN KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
28. helmikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

SIMOLIN, TONI: Sähköautojen latauslaitteiston keskusmäärittely

Diplomityö, 61 sivua, 4 liitesivua

Toukokuu 2018

Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta

Avainsanat: sähköautot, älykäs lataus, lataustapa 3, kuormanhallinta, aurinkosähkö, akusto, latauksen mallinnus

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää aurinkosähköstä ja akustosta saatavia hyötyjä sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä, joka koostuu useista latauspisteistä. Älykkään latauksen mahdollistamiseksi tarkastelu keskittyi lataustapaan 3, jota voidaan ohjata taustajärjestelmästä. Lisäksi työssä selvitettiin tulevia mahdollisuuksia ja haasteita, mikäli sähköajoneuvojen latauslaitteistot sijoitettaisiin omaan sähkökeskukseen, jolloin latauspisteille jäisi vain latauspistoke.

Ladattavien sähköajoneuvojen suosio on ollut selvästi kasvussa viimevuosien aikana, ja se on näkynyt latauslaitteistoja kohtaan osoitetussa kiinnostuksessa. Erilaiset tukimuodot ja ladattavien sähköajoneuvojen yleisen hintatason madaltuminen johtaa oletettavasti kysynnän kasvamiseen entisestään. Myös aurinkosähkö on jatkuvasti kasvattanut suosiotaan ja osoittautunut olevan kustannustehokas energian tuotantomuoto. Akustot ovat vielä kohtalaisen kalliita useisiin sovelluksiin, mutta niihin liittyen on tehty paljon tutkimusta ja yleinen hintataso vaikuttaa olevan laskussa.

Latauspisteiden tehon, aurinkosähköjärjestelmän koon ja akuston kapasiteetin taloudellisen mitoittamisen arviointiin toteutettiin työssä laskentaohjelma. Tämän laskentaohjelman avulla voidaan ottaa useita eri järjestelmäkokonaisuuteen liittyviä tekijöitä huomioon ja tarkastella niiden vaikutuksia aiheutuviin kustannuksiin. Akustoista saatavat säästöt järjestelmäkokonaisuuden käyttökustannuksissa jää vielä nykyhinnoilla niiden investointikustannuksia pienemmiksi. Laskennan tuloksista voidaan kuitenkin nähdä muun muassa kuormanhallinnasta saatava hyöty kuormitushuippujen pienentämisessä ilman, että ajoneuvoihin ladattava energia vähenee merkittävästi. Laskennassa voidaan myös todeta aurinkosähkön olevan taloudellisesti kannattava ratkaisu sähköajoneuvojen latauksessa esimerkiksi kauppakeskuksissa.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

SIMOLIN, TONI: Electric vehicle supply equipment hub specification

Master of Science Thesis, 61 pages, 4 Appendix pages

May 2018

Major: Renewable energy resource technologies

Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: plug-in vehicle, smart charging, mode 3, load management, photovoltaic, battery energy storage system, system energy calculations

The aim of this Master's thesis was to identify the advantages gained from the use of solar power and battery energy storage system for an electrical vehicle charging system that contains multiple charge points. The study focused on mode 3 charging to enable smart charging and load management. The thesis also includes an investigation of upcoming opportunities and challenges for a charging system where electric vehicle supply equipment is centralized into an electrical distribution center, leaving only a charging socket on the charging point.

The popularity of plug-in electric vehicles has been growing steadily over the last few years and has been reflected in the interest in electric vehicle supply equipment. Various forms of subsidies and the fall in the general price level of plug-in electric vehicles are likely to lead to a further increase in their demand. Photovoltaic power has also been continuously gaining popularity and has proven to be a cost-effective form of energy production. Battery energy storage systems are still quite expensive for many applications, but a lot of research has been conducted and their general high price level seems to be decreasing.

A calculation program was carried out to evaluate the effects of the power of the charge points, the size of the photovoltaic system and the battery capacity for the charging system. This calculation program is able to take into account multiple factors related to the charging system to enable evaluation of their economic effects. The operational cost savings from the use of battery energy storage systems remains below their investment costs. However, the results of the calculations show the advantage of load management on reducing the peak loads without losing a significant amount of potential electric vehicle charging energy. The calculations also indicate that solar power is economically feasible for electric vehicle charging system used, for example, in shopping centers.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Satmatic Oy:n ehdottamasta aiheesta. Olen kiitollinen, että sain mahdollisuuden tehdä diplomityöni hyvin mielenkiintoisesta aiheesta. Työn ohjaajana toimi Rainer Nurkkala, jota haluan kiittää työhön liittyvistä kommentteista ja ideoista. Työn tarkastajana toimi Pertti Järventausta, jolle haluan osoittaa kiitokset työhön liittyvästä materiaalista, hyvistä huomioista ja kehitysideoista.

Myös hyvä työilmapiiri on edesauttanut työn valmistumista. Tämän vuoksi haluan kiittää koko Satmaticin henkilökuntaa rennosta ja asiallisesta ilmapiiristä. Erityisesti Hannu Poussulle ja Anu Rantalalle haluan esittää suuret kiitokset avusta sekä asiantuntevista ja rakentavista kommentteista.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta koko opintieni aikana.

Porissa 2.5.2018

Toni Simolin

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoitteet ja rajaukset	3
2	Sähköajoneuvot ja niiden lataus	4
2.1	Liikenteen sähköistyminen	4
2.2	Sähköajoneuvojen latausinfrastruktuuri	5
2.3	Lataustavat	6
2.3.1	Lataustavat 1–2	7
2.3.2	Lataustapa 3	7
2.3.3	Lataustapa 4	10
2.3.4	Induktiivinen lataus	11
2.3.5	Akustonvaihtopalvelu	12
2.4	Pistoketyypit	12
2.5	Latauksen taustajärjestelmä	13
2.5.1	Tunnistautuminen ja laskutuksen periaate	14
2.5.2	OCPP	15
2.6	Kuormituksenhallinta	15
2.6.1	Ulkoisista tekijöistä riippuva tehoraja kuormanhallinnassa	16
2.6.2	Useamman latauspisteiden ryhmän sisältävä järjestelmä	18
2.6.3	Latauspisteiden tehonjako	20
2.7	Latauskeskusmalli	22
3	Aurinkosähkö- ja akustojärjestelmä osana latauskeskusta	24
3.1	Aurinkosähkö	24
3.1.1	Aurinkosähkön mitoituksessa huomioitavat tekijät	24
3.1.2	Aurinkosähkön hetkelliseen tuottoon vaikuttavat tekijät	26
3.1.3	Tarkasteltavassa järjestelmässä käytettävät aurinkopaneelit	27
3.2	Akustot	29
3.2.1	Akkujen ominaisuudet	29
3.2.2	Akuston yleinen toimintaperiaate käyttökohteessa	30

3.2.3	Tarkasteltavan akuston sopivuus järjestelmään	30
3.3	Vaihtosuuntaajat	31
4	Latausjärjestelmän rakenne	32
4.1	Vaatusmäärittely	34
4.2	Latauskeskuksen toteutusvaihtoehdot	35
5	Järjestelmäkokonaisuuden laskentamalli	37
5.1	Kuormituksen arviointi.....	37
5.2	Energian tuoton ja kulutuksen mallinnus järjestelmässä.....	39
5.3	Laskentaan liittyvät lähtötiedot ja oletukset	42
6	Laskennan tulokset järjestelmäkokonaisuudelle.....	44
6.1	Kauppakeskuksen latausjärjestelmä	44
6.1.1	Kuormanhallinnan vaikutus latausjärjestelmässä	46
6.1.2	Aurinkosähkön tuoton vaikutus latausjärjestelmässä.....	47
6.1.3	Akuston vaikutus latausjärjestelmässä	51
6.1.4	Teholtaan pienempien latauspisteiden käytön vaikutus	53
6.2	Työpaikan latausjärjestelmä	54
6.2.1	Pienemmän lataustehon hyödyntäminen.....	56
6.2.2	Aurinkosähkön tuoton vaikutus latausjärjestelmässä.....	57
6.2.3	Akuston vaikutus latausjärjestelmässä	58
7	Yhteenveto	60

LYHENTEET, MERKINNÄT JA MUUTTUJAT

Lyhenteet

AC	eng. Alternating Current, vaihtovirta
AM	eng. Air Mass, ilmamassa
BESS	eng. Battery Energy Storage System, akusto
CAN	eng. Controller Area Network, protokolla laitteiden ja mikrokontrollerien väliseen kommunikointiin
CCS	eng. Combined Charging System, ladattavien ajoneuvojen pikalataus tapa
CP	eng. Control Pilot, latausliittimen signaali johto
DC	eng. Direct Current, tasavirta
DoD	eng. Depth of Discharge, akun purkaussyvyys
EV	eng. Electric Vehicle, sähköajoneuvo
I/O	eng. Input/Output, mm. automaatiassa käytetty kommunikointi periaate
IC-CPD	eng. In-Cable Control and Protection Device, latauskaapelin sisältämä ohjaus- ja suojauslaite
IPT	eng. Inductive Power Transfer, induktiivinen tehonsiirto
MPP	eng. Maximum Power Point, maksimitehopiste
MPPT	eng. Maximum Power Point Tracker, maksimitehopisteen seuranta
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OCA	Open Charge Alliance
OCPP	Open Charge Point Protocol, sähköajoneuvojen lataukseen tarkoitettu avoin kommunikointirajapinta
P&O	eng. Perturb and Observe, yleinen maksimitehopisteen seuranta tapa
PEV	eng. Plug-in Electric Vehicle, ladattava sähköajoneuvo
PHEV	eng. Plug-in Hybrid Electric Vehicle, ladattava hybridi ajoneuvo
PP	eng. Proximity Plug, toinen latausliittimen signaali johto
PWM	eng. Pulse-Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
RFID	eng. Radio Frequency Identification, radiotaajuinen etätunnistus menetelmä
SOC	eng. State Of Charge, akuston varaustila
SS	eng. Shading Strength, varjostuksen voimakkuus
STC	eng. Standard Test Conditions, määrittelee aurinkopaneelien testausolosuhteet
V2G	eng. Vehicle To Grid, energian syöttö ajoneuvosta sähköverkkoon
WPT	eng. Wireless Power Transfer, langaton sähköajoneuvon lataus

Merkinnät ja muuttuja

A	ampeeri
GW	gigawatti
$C_{E,Grid,f}$	verkosta otettavan sähkön ostoarvo
$C_{E,Grid,t}$	verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo
D_N	nimellinen ohjaussignaalin käyttöjakso (eng. duty cycle)
$E_{B,max}$	akuston maksimivaraus
$E_{B,SOC}$	akustossa oleva varaus tarkasteltavalla hetkellä
$E_{B,SOC,2}$	akuston uusi varaus
$E_{EV,miss}$	ladattavaan ajoneuvoon mahtuvaa energiaa
$E_{Grid,f}$	verkosta otettava kokonaisenergia
$E_{Grid,t}$	verkkoon syötettävä kokonaisenergia
E_{load}	toteutuva ajoneuvoihin ladattava energia
$E_{Load,max}$	ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia
E_{PV}	aurinkosähkön tuottama kokonaisenergia
G_s	pilven suurimman varjostuksen aikainen säteily määrä
G_{us}	varjostumattoman tilanteen säteily määrä
Hz	hertsi
I_{max}	ajoneuvon käytössä oleva maksimilatausvirta
I_N	kaapelin nimellisvirta
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
l	latauksessa olevien ajoneuvojen määrä
mA	milliampeeri
MW	megawatti
MWh	megawattitunti
off-grid	paikallinen mikroverkko, joka ei ole liittynään sähköverkkoon
$P_{B,C}$	toteutuva akuston latausteho
$P_{B,C,max}$	akuston yleinen maksimilatausteho
$P_{B,C,max,p}$	akustoon ladattava potentiaalinen maksimiteho
$P_{B,D}$	toteutuva akustosta purkausteho
$P_{B,D,max}$	akuston yleinen maksimipurkausteho
$P_{B,D,max,p}$	akustosta saatavaa potentiaalista maksimitehoa
$P_{CP,max}$	latauspisteen yleinen maksimiteho
$P_{EV,C,max}$	ladattavan ajoneuvon yleinen maksimilataustehoa
$P_{EV,C,p}$	ajoneuvon potentiaalinen latausteho
$P_{Grid,f}$	toteutuva verkosta otettava teho
$P_{Grid,loss}$	hukkaan menevä teho
$P_{Grid,max,f}$	verkosta otettava yleinen maksimiteho
$P_{Grid,max,t}$	verkkoon syötettävä yleinen maksimiteho
$P_{Grid,t}$	toteutuva verkkoon syötettävä teho

$P_{I,loss}$	invertterin alimitoituksesta johtuva hukkateho
$P_{I,max}$	invertterin maksimiteho
$P_{I,out,max,p}$	invertteriltä saatava potentiaalinen maksimiteho
P_{Load}	toteutuva kuorma
$P_{Load,p}$	latausaseman potentiaalinen kokonaiskuorma
P_{PV}	aurinkosähköstä saatava tuotto
t	tarkasteltavan aikajakson pituus
V	voltti
W	watti
$\eta_{B,C}$	akuston hyötysuhde varautumisessa
$\eta_{B,D}$	akuston hyötysuhde purkautumisessa
η_{CP}	latauslaitteiston hyötysuhde
η_I	invertterin hyötysuhde

1 Johdanto

Päästötavoitteiden jatkuvan tiukentumisen seurauksena ympäristöystävällisten ajoneuvojen houkuttelevuus kasvaa jatkuvasti. Vaihtoehtoja energialähteeksi bensiinille löytyy muun muassa biodieselistä, kaasusta ja sähköstä. Näistä erityisesti ladattaviin sähköautoihin (Plug-in Electric Vehicle, PEV), joihin sisältyy täyssähköautot ja ladattavat hybridit (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV), kohdistuu huomattava määrä kiinnostusta ja niiden määrän kasvu tieliikenteessä voidaankin jo havaita.

Sähköautojen etuihin kuuluu täysi paikallinen päästöttömyys, kun puhutaan täyssähköautoista, suuri energiatehokkuus ja pienet käyttökustannukset. Polttomoottoreita halvemmat käyttökustannukset johtuvat vähäisemmästä huollon tarpeesta, koska liikkuvia osia on vähemmän, ja siitä, että bensiini on huomattavasti sähköä kalliimpaa. Vaikka sähköautojen latauksessa onkin miinuspuolensa perinteisiin bensamoottoreihin nähden, niin hidas kotilataus voidaan nähdä kuitenkin myös etuna. Lisäksi ladattavien hybridiajoneuvojen hinta on jatkuvasti lähestynyt vastaavia pelkällä bensiinillä toimivia ajoneuvoja, mikä näkyy selvästi niiden suosion kasvussa.

Täyssähköautojen yleistymistä jarruttaa ajoakkujen kallis hinta, joka nostaa ajoneuvon hinnan selkeästi muilta ominaisuuksiltaan vastaavia polttomoottoriajoneuvoja kalliimmaksi. Sähköautojen latausaikojen pituudet sekä käytettävien latauspisteiden määrä koetaan ongelmallisina erityisesti, kun on tarve ajaa pidempiä matkoja. Kunnollinen latausinfrastruktuuri onkin vielä kehitteillä. Latauspisteille on tarvetta usealle erityyppiselle sijainnille ja siten myös erilaisille latausnopeuksille. Kotilataukseen on perusteltua ajatella sopivan hidas lataus, kun taas pikateiden varsilla oleville huoltoasemille nopea lataus. Tässä työssä tarkastellaan puolinopeaa latausta, jonka kohteena olisi esimerkiksi parkkialueet, kauppojen pihat, työpaikat tai muut vastaavat kiinteistöt.

1.1 Työn tausta

Tämä työ on tehty Satmatic Oy:n ehdottamasta aiheesta. Satmatic on vuonna 1988 perustettu teknologiateollisuusalan yritys. Satmaticin toimipisteet sijaitsevat Ulvilassa ja Keravalla, joissa toimii yhteensä 120 henkilöä. Lisäksi Satmatic omistaa Kurikassa toimivan Finnkumu Oy:n, joka valmistaa ja myy pääasiassa sähkönjakeluun tarkoitettuja puistomuuntamoita ja jakokaappeja. Satmatic Oy on osa AS Harju Elekter konsernia, joka

toimii Suomen lisäksi Ruotsissa, Virossa ja Liettuassa. Satmaticin liikevaihto oli 46,45 miljoonaa euroa vuonna 2017, ja päätoimialat ovat teollisuuden sähköistys- ja kokonaisprojektit, sekä matala- ja keskijännitesektorin laitteet ja infrastruktuuri. Auton lämmitysrasioita on Satmaticilla valmistettu jo kaksikymmentä vuotta, mutta viime vuosina sähköajoneuvojen latausratkaisuista on kehittynyt myös merkittävä osa-alue. Satmaticin valmiista lataustuotteista löytyy latauspisteitä yksikertaisesta sukopistorasialla varustetusta latausrasiasta aina 22 kW tehoiseen etäohjattavaan lataustolppaan. Suurin osa aikaisemmista sähköajoneuvojen lataukseen liittyvistä projekteista Satmatic Oy:llä on liittynyt yksittäisiin lataustolppiin, mutta tulevaisuudessa on odotettavissa kysynnän painottuvan enemmän älykkäisiin latausjärjestelmiin. Latausjärjestelmien kysyntä on myös selvästi kasvussa sekä määrällisesti että lataustehon ja latauspaikkojen osalta.

Tämän työn tavoitteena on määritellä sähköajoneuvojen latausratkaisuksi latauskeskusmalli, jonka avulla pyritään vastaamaan isomman latausjärjestelmän asettamiin vaatimuksiin. Järjestelmäkokonaisuuden yhteydessä tarkastellaan aurinkosähköjärjestelmää, jonka avulla voidaan vähentää verkosta otettavan energian määrää tai mahdollistaa suurempi hetkittäinen maksimilatausteho, ja akustoa, jolla voidaan kasvattaa aurinkosähkön omakäyttöä. Tarkasteltavista osuuksista Satmaticilta löytyy entuudestaan jokaisesta erikseen vaihtelevan laajuisesti kokemusta, mutta tässä työssä halutaan tarkastella niiden hyödyntämistä yhdessä järjestelmäkokonaisuudessa.

Tämän työn aiheeseen liittyviä tai aiheetta sivuavia tutkimuksia löytyy kirjallisuudesta muutamia. Esimerkiksi lähteessä [1] on tutkittu aurinkosähköjärjestelmällä varustetun sähköajoneuvojen latausjärjestelmän verkosta otetun maksimivirran rajoitusta siten, että siinä huomioidaan aurinkosähköstä saatava tuotto. Lisäksi tehon rajoittamisessa on hyödynnetty avointa OCPP (Open Charge Point Protocol) kommunikointiprotokollaa, joka on tämänkin työn kannalta oleellinen. Lähteessä [2] on tarkasteltu aurinkosähköllä ja akustoilla varustetun sähköajoneuvojen latausjärjestelmän sopivuutta latauskuormaltaan erilaisissa kohteissa. Tarkasteltavat kohteet olivat asuinpaikat, työpaikat ja julkiset alueet, joille kullekin on eroteltavissa ominaiset sähköajoneuvojen latauksesta johtuvat kuormituskäyrät. Lähteessä [3] on kehitetty algoritmi optimoimaan aurinkosähköjärjestelmän, akuston kapasiteetin ja verkon liittymispisteen muuntajan kokoa. Kyseinen algoritmi on toiminut innovaattorina tässä työssä tehdyille laskentaesimerkeille, joiden avulla voidaan vertailla eri mitoituksilla saatuja hyötyjä. Lähteessä [4] on analysoitu sähköajoneuvojen latausjärjestelmää, joka hyödyntää aurinkosähköjärjestelmää ja sähköajoneuvojen akustoista energian verkkoon syöttöä (V2G, Vehicle to Grid).

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

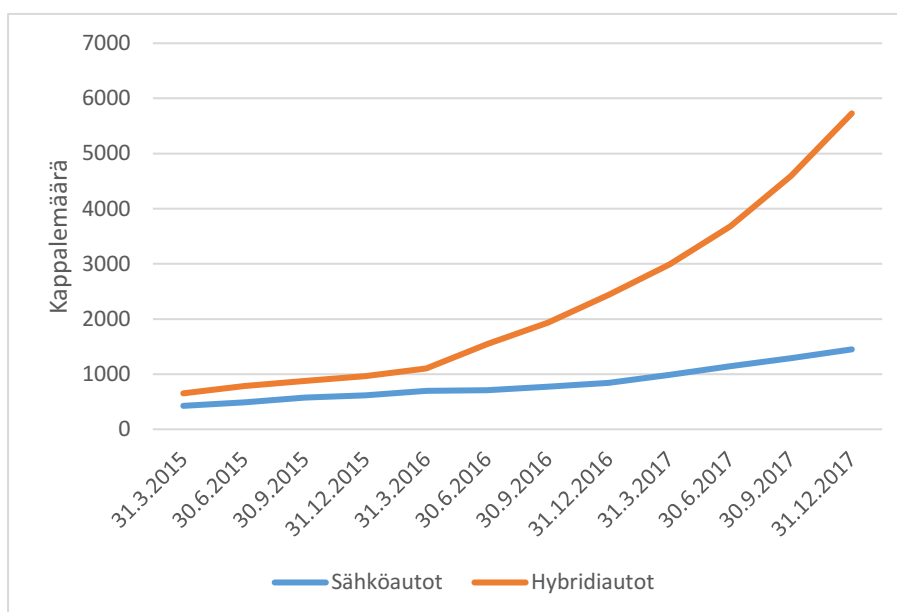
Tämän työn tavoitteena on määritellä tekniset reunaehdot sähköajoneuvojen latauskeskusjärjestelmälle, joka hyödyntää aurinkosähköä ja akustoja sähköverkon tukena, ja arvioida sen kannattavuutta. Työn ohella toteutettiin myös yrityksen sisäiseen käyttöön tarkoitettu tarkempi määrittely latausaseman toteuttamiselle hiljattain markkinoille tulleilla automaatiokomponenteilla sekä laskentaohjelma, jolla voidaan mallintaa käyttökohteen energiankäyttöä ja arvioida kannattavinta ratkaisua järjestelmäkokonaisuudelle. Tavoitteena on saada myynnin ja suunnittelun tueksi mahdollisimman kattava tarkastelu, jota voidaan hyödyntää mahdollisissa tulevaisuuden aihealueen projekteissa. Erityisesti akustojen ollessa vielä suhteellisen kalliita niistä saatavaan taloudelliseen hyötyyn nähden, on tarkastelun hyöty niiden osalta enemmän tulevaisuuden kysyntään varautumisessa kuin nykyhetken kysyntään vastaamisessa.

Työn kolmea pääaihealuetta käsitellään painottamalla latausjärjestelmän kannalta olennaisimpia asioita. Aurinkosähkön ollessa Satmatic Oy:lle hyvin tuttu aihe, käsitellään sitä vain pintapuolisesti. Akustoista pyritään käsittelemään työn kannalta olennaisimmat ominaisuudet, joiden avulla voidaan arvioida jo tarjolla olevien valmiiden akustojen sopivuutta järjestelmään. Kapasiteetiltaan suurempien akustokokonaisuuksien tarkastelu rajataan tämän työn ulkopuolelle. Sähköajoneuvojen lataukseen liittyvän teknologian ja säädösten kehittyessä jatkuvasti, luodaan niistä kattavampi katsaus. Varsinaisten sähköajoneuvojen syvempi tarkastelu jätetään työn ulkopuolelle. Sähköajoneuvojen latausta käsittelevän luvun yhteydessä esitellään sähköajoneuvojen latauskeskusmalli, jonka ajatuksena on siirtää ”äly” latauspisteistä kootusti yhteen keskukseseen. Tälle mallille on tavoitteena selvittää siltä vaadittavat ominaisuudet, sen skaalautuvuus sekä sen tuomat edut ratkaisuna usean sähköajoneuvon latauspisteen sisältävälle latausjärjestelmälle. Latauskeskusmallin tarkastelussa keskitytään puolinopean vaihtovirtalatauksen hyödyntämiseen.

2 Sähköajoneuvot ja niiden lataus

2.1 Liikenteen sähköistyminen

Trafin ylläpitämän tietokannan mukaan liikennekäyttöön rekisteröityjen täyssähköajoneuvojen ja hybridisähköajoneuvojen määrä on ollut jatkuvassa kasvussa. Täyssähköajoneuvojen määrä oli vuoden 2017 lopussa noin 1500, joka on yli nelinkertainen kolme vuotta aikaisempaan määrään 360 nähden. Hybridiautojen vastaava lukumäärä oli reilu 5700, joka on kasvanut kolmen edellisen vuoden aikana yli 800 %, mikä siis tarkoittaa niiden määrän keskimäärin kaksinkertaistuneen vuodessa tänä aikana. Kuvassa 1 on havainnollistettu edellä mainittuja lukuja. Hallituksen hyväksymän kansallisen energia- ja ilmastostrategian mukaan Suomeen on tavoitteena saada 250 000 sähköautoa vuoteen 2030 mennessä [5]. Vaikka sähkö- ja hybridiajoneuvojen osuus koko Suomen autokannasta onkin vielä alle prosentti, voi niiden määrä nykyisellä kasvusuhteella hyvinkin päästä hallituksen asettamaan tavoitteeseen. [6]



Kuva 1. Liikennekäytössä olevat sähkö- ja hybridiautot [6].

Ladattavien hybridi- ja täyssähköajoneuvojen yleistymistä on edesauttanut tekniikan kehittyminen, hintatason alentuminen sekä niitä varten toteutetut tukihankkeet. Erityisesti viime vuosien aikana hybridiajoneuvojen hinta on lähestynyt vastaavia polttomoottoriajoneuvoja, mikä näkyy niiden ensirekisteröintien määrän selvässä kasvussa. Myös yrityksille suunnattu sähköajoneuvoja ja niiden latauslaitteita varten vuosina 2011–2017 toteutettu energiatukiohjelma on lisännyt kiinnostusta sähköajoneuvoja kohtaa. Tätä varten suunniteltu 9 M€ tukibudjetti käytettiin kokonaan [7].

Ympäristöystävällisemmän autoilun tukemiseksi on vuoden 2018 alussa tullut voimaan romutuspalkkio ja sähköautojen hankintatuki, jossa budjetti on yhteensä 14 miljoonaa euroa neljälle seuraavalle vuodelle [8]. Tämän romutuspalkkion piiriin kuuluu sähköajoneuvojen lisäksi maa-, biokaasu- ja korkeaseosetanolikäyttöiset sekä vähäpäästöiset bensiini- ja dieselkäyttöiset ajoneuvot. Tulevaisuudessa onkin todennäköisesti odotettavissa olevan useita erityyppisiä ajoneuvoja, jotka käyttävät erilaisia polttoaineita tai niiden yhdistelmiä energialähteinään. Sähköajoneuvojen on kuitenkin ennustettu olevan näistä merkittävien tekijä ympäristöystävällisen ja kestäväen kuljetuksen ratkaisuksi. Tätä tukee myös se, että lähes jokainen autovalmistaja on viimeisten vuosien aikana lanseerannut oman sähköajoneuvonsa markkinoille [9].

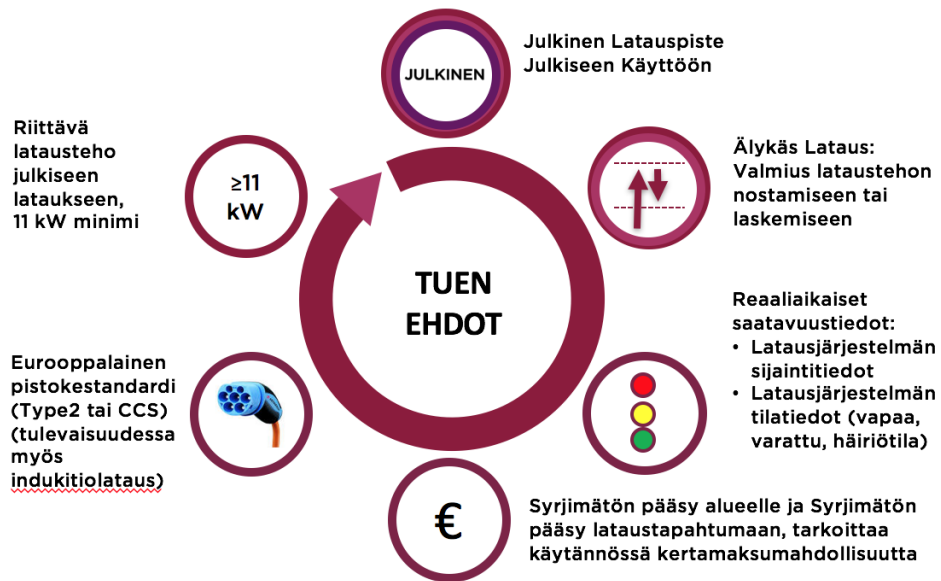
2.2 Sähköajoneuvojen latausinfrastrukturi

Sähköajoneuvojen latauksessa ongelmallisena pidetään erityisesti latausinfrastruktuurin puutetta ja pitkiä latausaikoja. Suomessa oli vuoden 2017 lopussa noin 380 julkista latausasemaa, joista löytyi edelleen yhteensä noin 1600 latauspistoketta [10]. Näistä latauspistokkeista noin 40 % hyödynsi puolinopeaa lataustapaa 3, 22 % nopeaa lataustapaa 4 ja loput hitaita lataustapoja 1 tai 2 [10], lataustavat esitellään tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Vertailuksi mainittakoon, että perinteisten polttomoottoriajoneuvojen tankkaamiseen tarkoitettuja asemia oli vuoden 2016 lopulla Suomessa yli 1800 [11], joka on siis noin viisinkertainen julkisten sähköajoneuvojen latausasemien määrään. Polttomoottori- ja sähköajoneuvojen välinen vertailu latausinfra suhteen ei kuitenkaan ole aivan suoraviivaista. Tämä johtuu sähköajoneuvojen kotilatauksen mahdollisuudesta sekä siitä, että polttomoottoriajoneuvon tankkaaminen on vielä keskimäärin huomattavasti nopeampaa sähköajoneuvojen lataamiseen verrattuna.

Ladattavien sähköajoneuvojen ja latauspisteiden lisääntymisestä puhuttaessa nousee usein esille myös sähköverkon sähkönsiirtokapasiteetin riittävyys. Tähän liittyen on tehty tutkimuksia, joissa on arvioitu sähköajoneuvojen aiheuttaman kuorman kasvun vaikutusta [12;13]. Näiden vaikutusten on kuitenkin arvioitu olevan kohtalaisen vähäisiä. Sähköverkon puolesta Suomeen sopinee melko paljon ladattavia sähköajoneuvoja, mutta joissain tapauksissa tarvitaan kuormanohjausta [9]. Suomen siirto- ja jakeluverkkojen on arvioitu kestäväen keskimäärin jopa siitä syntyvä kuorma, että koko autokanta vaihtuisi sähköautoihin [14]. Sähköverkon keskimääräisen kuorman kestäminen ei kuitenkaan ole riittävä lähtökohta, vaan siinä tulee huomioida sähköajoneuvojen latauksen aiheuttamat paikalliset kuormitushuiput. Tätä varten sähköajoneuvojen latauksen älykkyyttä tulee kehittää.

Latausinfrastruktuurin edistämiseksi työ- ja elinkeinoministeriö on myöntänyt tukea julkisiin latauspisteisiin vuoden 2017 alusta. Investointeja tuetaan 4,8 miljoonalla eurolla ja tavoitteena on kolminkertaistaa nykyinen julkinen latausverkosto vuosien 2017–2019

aikana. Kuvassa 1 on esitetty latausjärjestelmältä vaadittavat ominaisuudet, jotta tukea voi saada. [15]



Kuva 2. Lataustuen vaatimukset [15].

Latausjärjestelmän investointituen suuruus on pikalataukselle 35 % ja normaalille lataukselle 30 % asennukseen ja hankintaan liittyvistä kustannuksista. Pikalataukselle, joka on tässä määritelty yli 22 kW tehon tasavirtalataukseksi, on priorisoitu puolet tuesta. Tässä työssä käsiteltävän latauskeskusmallin on tarkoitus omalta osaltaan täyttää lataustuen ehdot normaalin vaihtovirtalatauksen tapauksessa. [15]

Sähköajoneuvojen latausinfraan liittyy useita standardeja. Tärkeimmät näistä ovat IEC 61851 ja 62196. Ensimmäinen, IEC 61851, käsittelee sähköisiä ja mekaanisia ominaisuuksia verkon ja ajoneuvon välisessä yhteydessä. IEC 62196 käsittelee latauksessa käytettäviä pistokytimiä. Nämä standardit ovat keskeisiä tämän työn kannalta. Näiden lisäksi on sähköajoneuvojen lataukseen liittyen määritetty standardeja muun muassa johdottomalle lataukselle IEC 61980, akunvaihtoasemille IEC 62840, kommunikoinnille sähköajoneuvosta verkkoon energian syötölle (Vehicle to Grid, V2G) ISO 15118, latauspisteen turvallisuudelle IEC 61140 ja 61508 sekä tietotekniselle turvallisuudelle IEC 15408 ja 27001.

2.3 Lataustavat

Sähköajoneuvojen lataukseen on standardissa EN 61851-1 määritelty neljä tapaa, jotka ovat nimetty yksinkertaisesti lataustapa (Mode) 1–4. Ensimmäiset kaksi voidaan luokitella hitaaseen lataukseen, tapa 3 puolinopeaan ja tapa 4 pikalataukseksi. Näiden lisäksi sähköajoneuvoon voidaan saada virtaa lataamalla akkuja johdottomasti induktiolla

tai vaihtamalla tyhjentyneet akut täydempiin. Lataustapoja käydään tarkemmin läpi seuraavissa kappaleissa. Lataustapojen vertailussa on muistettava huomioida ladattavien ajoneuvojen asettamat rajoitteet. Eri ajoneuvoilla on tyypillisesti erilaiset maksimilataustehot, eikä jokainen ajoneuvo tue kaikkia lataustapoja.

2.3.1 Lataustavat 1–2

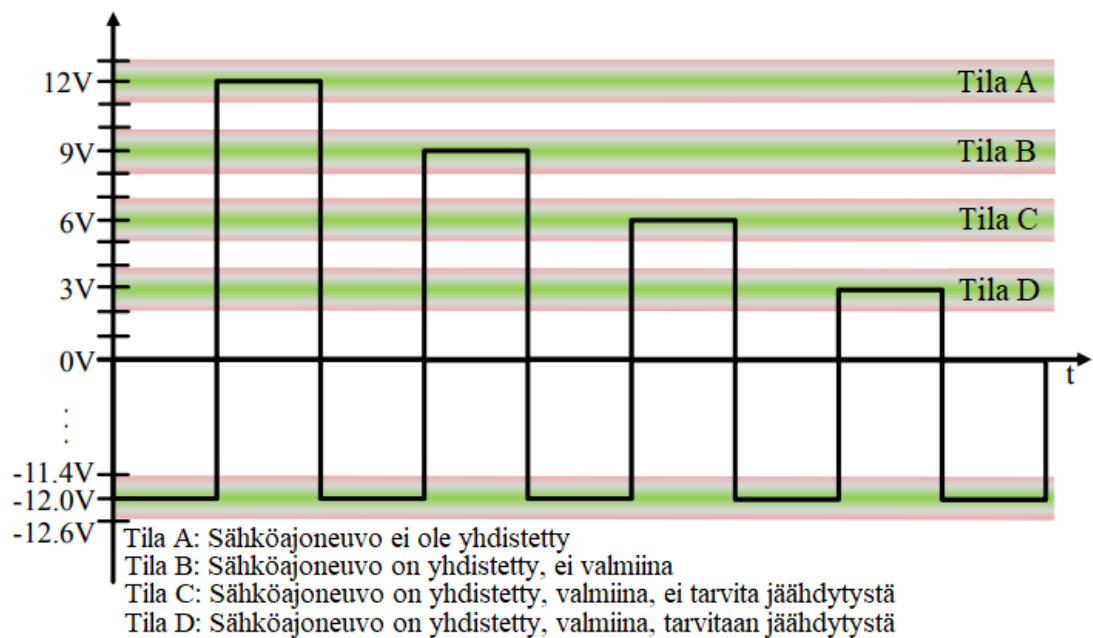
Lataustavassa 1 (Mode 1) käytetään sukopistorasiaa tai normaalia kolmivaiheista pistorasiaa. Syöttöpuolelta käytetään korkeintaan 16 A virtaa ja 250 V yksivaihe- tai 480 V kolmivaihejännitettä. Tätä lataustapaa käytetään suurimmaksi osaksi sähköpyörien, sähkömopojen ja muiden kevyiden sähköajoneuvojen lataamiseen eikä niinkään sähköautojen lataukseen. Sähköajoneuvojen tilapäiseen lataukseen tarkoitettu lataustapa 2 (Mode 2) on vastaavanlainen kuin lataustapa 1, mutta käytettävä virta on korkeintaan 32 A. Hyödynnettäessä lataustapaa 2 sähköauton lataukseen pitää käyttää autoon tarkoitettua latausjohtoa, joka sisältää virtaa rajoittavan ohjauslaitteen (In-Cable Control and Protection Device, IC-CPD). Tämä IC-CPD rajoittaa virran turvalliseen tasoon, joka on kotitalouspistorasialle soveltuva. Pitkän latausajan turvallinen virtataso, jossa virtaa ei rajoiteta turhan paljoa, on kuitenkin hieman epäselvä [9]. SFS 5610 mukaista kotitalouspistokytkintä käytettäessä pitkäaikainen latausvirta on suositeltu rajoitettavaksi 8 ampeeriin, jolloin latausteho jää alle 2 kW [16]. Lähes jokaisen kaupallisen täyssähkö- ja hybridi ajoneuvon mukana tulee tähän lataustapaan soveltuva latausjohto. [17;18]

Sähköajoneuvojen hitaan latauksen valmiutta löytyy Suomesta melko paljon, sillä polttomoottorien esilämmitysverkosto voidaan muuttaa helposti sähköajoneuvon hitaaksi lataukseksi. Erityisesti työpaikoilla ja asuinalueilla on potentiaalisesti jo useita autojen lämmitysrasioita, jotka voidaan muuttaa hitaan latauksen latauspisteiksi. Lisäksi näissä on tyypillinen pysähtymisaika useita tunteja, minkä johdosta hidas lataus saattaa olla riittävä monelle eikä suuremman lataustehon mahdollisuus välttämättä tuo aina lisäarvoa. Hitaan latauksen onkin arvioitu pysyvän suosituimpana sähköajoneuvojen lataustapana pitkään.

2.3.2 Lataustapa 3

Käytännössä kaikissa markkinoilla olevissa sähköajoneuvoissa mahdollistettu lataustapa 3 (Mode 3) on puolinopea vaihtosähkölataus, jossa käytetään standardin EN 62196-2 mukaista latauspistoketta ja ajoneuvovastaketta [18]. Lataustavalla 3 voidaan eurooppalaisen pistokestandardin mukaisella pistokkeella käyttää 1-, 2- tai 3-vaiheisia latureita, joissa niiden vaiheet voivat olla yhdistetty pistokkeen vaiheisiin vapaassa järjestyksessä [18]. Lataustavan jännite on kolmivaiheisena 400 V ja virta voi olla 6–63 A, mikä tarkoittaa maksimissaan noin 43 kW tehoa. [17]

IEC 61851 standardin mukaan sähköajoneuvon lataustapa 3 vaatii tehonsiirtojohtimien lisäksi kaksi lisäsignaalia lataustehon säätöä ja latauksen turvallisuuden varmistamista varten. Signaali PP (Proximity Plug) on pistokkeen ja latausliittimen välisen liitoksen tunnistamista varten ja ohjaussignaali CP (Control Pilot) kommunikaatiota varten. Ohjaussignaalin avulla latauspiste välittää tiedon käytettävissä olevasta maksimivirrasta sähköajoneuvolle pulssinleveysmodulaatiolla (Pulse-Width Modulation, PWM) pulssisuhteen avulla [18]. Samassa ohjaussignaali sähköajoneuvolta välittyy tilatieto sen akuston mahdollisuudesta vastaanottaa virtaa, mikä näkyy pulssin positiivisessa huippuarvossa. Kuvassa 3 on havainnollistettu lataustilan vaihtoehdot. Käyttövarmuussyistä neljän normaalin lataustilan jännitetasossa sallitaan yhden voltin ero molempiin suuntiin. Viides tila, -12 V, on sähköajoneuvon ulkopuolisen latausjärjestelmän virhetilanteita varten. Varsinainen tehonsiirto tapahtuu vain tilassa C, mikäli tarvittavaa jäähdytystä ei ole saatavilla. [19]



Kuva 3. Lataustilan vaihtoehdot sähköajoneuvon kannalta. Muokattu lähteestä [19].

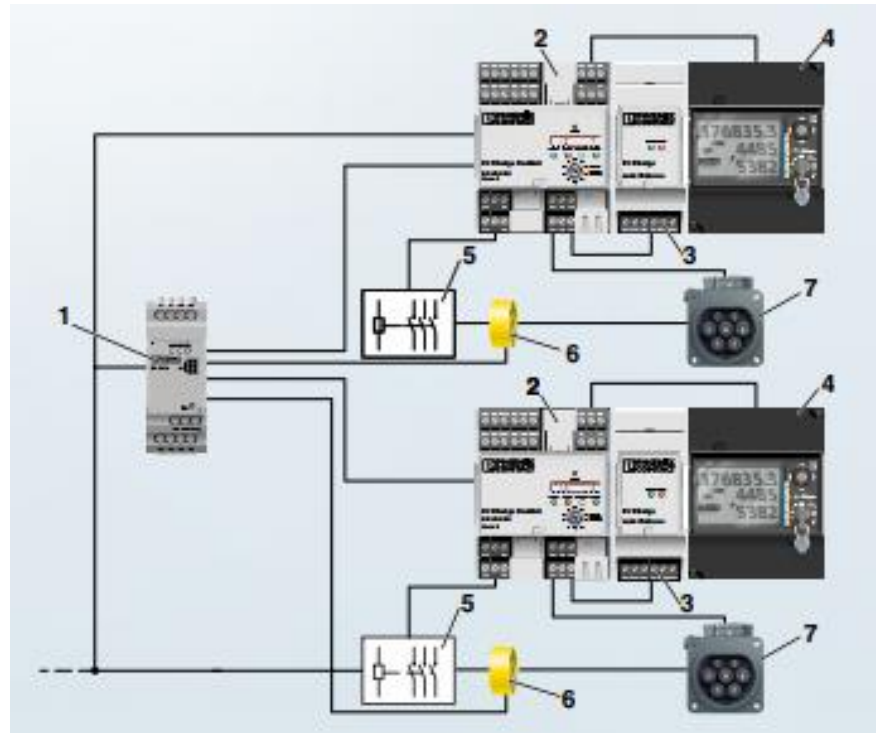
Latauspisteen ja siten myös siinä sen hetkisesti ladattavan sähköajoneuvon käytettävissä olevan maksimilatausvirran ja pulssisuhteen välinen yhteys on kuvattu taulukossa 1. Tässä on huomioitava se, että latausaseman asettama maksimivirtaraja määrittää vain sähköajoneuvon ottaman virran suurimman arvon ja sähköajoneuvon oma latauslaite päättää todellisen virran tämän rajoissa. Tämä tieto maksimivirtasta on yksisuuntainen siinä mielessä, että latausasema ei saa tietoa ladattavan ajoneuvon latausvirran tarpeesta. [18;19]

Taulukko 1. Käytettävissä olevan latausvirran ja pulssisuhteen välinen yhteys. Muokattu lähteestä [19].

Maksimivirta vaihetta kohden I_{\max}	Nimellinen ohjaussignaalin käyttöjakso D_N (duty cycle)	Kuvaus
Maksimivirta ilmoitetaan digitaalisen kommunikoinnin avulla	$D_N = 5 \%$	Vaatii digitaalisen yhteyden muodostumisen
$6 \text{ A} \leq I_{\max} \leq 51 \text{ A}$:	$D_N = I_{\max} / 0,6$	$10 \% \leq D_N \leq 85 \%$
$51 \text{ A} \leq I_{\max} \leq 80 \text{ A}$:	$D_N = (I_{\max} / 2,5) + 64$	$85 \% \leq D_N \leq 96 \%$

Näiden vaatimusten toteuttamiseksi lataustapaa 3 hyödyntävässä latauspisteessä tarvitaan sitä varten suunniteltu ja standardin IEC 61851 mukainen lataussäädin. Lisäksi latauspisteessä vaaditaan muun muassa 30 mA vikavirtasuojakytkin [16]. Tässä on oleellista huomioda se, että autonvalmistaja voi erikseen vaatia B-tyypin vikavirtasuojan käyttöä [16]. Koska tämän työn sisällä tarkasteltava järjestelmä on suunnattu julkista latausta varten ja hyödyntää juuri lataustapaa 3, tulee latauspisteissä varautua tähän. Latauspiste voidaan periaatteessa toteuttaa ilman energianmittausta, mutta koska niiden avulla voidaan latausasemasta tehdä älykkäämpi, kuten kappaleessa 2.5.1 todetaan, otetaan ne mukaan latauspisteeseen tässä työssä tarkasteltavassa järjestelmässä. Euroopan unioni tullee myös edellyttämään julkisten pisteiden varustamista älykkäällä sähköenergian mittauksella [16].

Turvallisuuden lisäämiseksi latauspisteessä tulisi olla pistotulpan lukitusta varten mekanismi, jotta pistotulppaa ei saa irrotettua tehonsiirron aikana. Lukituksen toteutusperiaatteita on erilaisia, jotka reagoivat eri tavalla sähkökatkon aikana. Mikäli latauspistotulpan lukitus ei itsestään poistu sähkökatkon aikana, olisi sitä varten hyvä olla oma toimilaite, joka antaa vian ilmetessä tarpeeksi virtaa pistotulpan lukituksen poistoon. Latauspisteen rakenteen havainnollistamista varten kuvassa 4 on yksinkertaistettu esimerkki latauspisteestä, jossa on kaksi lataustavan 3 latauspistorasiaa.



Kuva 4. Latauspisteen yksinkertaistettu malli lataustavalla 3 [20].

Kuvan 4 esimerkkiin sisältyy vikavirtasuoja (1), lataussäädin (2), lukituksen vapauttamismoduuli (3), energiamittari (4), latauskatkaisija (5), vikavirran mittauskäämi (6) ja latauspistorasia (7). Vaikka lataustapaa 3 hyödyntävä latauspiste voidaan toteuttaa erilaisilla komponenteilla, on kyseisestä latauspisteestä pitkälti löydyttävä kaikki edellä mainittujen komponenttien toiminnot.

2.3.3 Lataustapa 4

Lataustapa 4 (Mode 4), josta käytetään myös nimitystä pikalataus, eroaa kolmesta edellisestä oleellisesti siinä, että sähköajoneuvoon siirretään tasasähköä vaihtosähkön sijasta. Tätä varten vaihtosähköverkkoon liitettävä latauspiste sisältää erillisen tasasuuntauksen ja ajoneuvon ulkopuolisen laturin, joka on tiedonsiirtoväylällä yhteydessä ajoneuvoon lataustehon ohjausta varten. Soveltuvat pistorasiat ovat joko EN 62196-3 tai CCS-standardin mukaisia. Lataustapa 4 on yleensä teholtaan AC latausta suurempaa ja voi olla maksimissaan 120–170 kilowattia. Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta markkinoilla olevien sähköajoneuvojen maksimilataustehot ovat kuitenkin usein alle 50 kilowattia. Tästä syystä tehokkaamman latauslaitteen korkeammista kustannuksista ei aina saada käyttäjälle lisäarvoa, mikä vähentää kiinnostusta niitä kohtaan. [9;17]

Sähköajoneuvojen latausnopeudet eivät vielä pärjää vertailussa perinteisiin polttomoottoriajoneuvoihin, mutta tämä ero on hiljalleen kaventumassa. Tästä

esimerkkinä Porschen paljastama uusi automalli Mission E, jonka on tarkoitus tulla markkinoille 2020. Sen on luvattu tukevan 350 kW lataustehoa, jota varten heillä on myös saman tehon latauspiste [21]. Tämän lataustehon on luvattu tuovan energiaa 400 km matkaa varten 15 minuutissa [22]. Myös Audi, BMW ja Renault ovat mukana aloitteessa vastaavan lataustehon mahdollistamisessa [23].

Suuria lataustehoja hyödyntäessä latauspisteen rakenne hieman monimutkaistuu häviöistä aiheutuvan lämpenemisen vuoksi. Liiallisen lämpenemisen välttämiseksi sekä latauslaitteella että ladattavan ajoneuvon akustolla täytyy olla asianmukainen jäähdytys. Latauspisteen puolelle Phoenix Contactilta löytyy CCS-lataustapaan perustuva latauskaapeli, jossa latauskaapelissa on nestejäähdytys, joka mahdollistaa 500 kW lataustehon [24]. Mikäli sähköajoneuvon akusto voi ottaa vastaan näin suurta tehoa, voidaan jo muutamassa minuutissa ladata energiaa 100 kilometrin matkan vaatima määrä. Pikalatauksen tarkempi käsittely jätetään kuitenkin tämän työn ulkopuolelle mahdolliseksi jatkokehityskohteeksi.

2.3.4 Induktiivinen lataus

Sähköajoneuvon akustoa voidaan perinteisistä lataustavoista poiketen ladata myös langattomasti ilman galvaanista yhteyttä. Induktiivisessa tehonsiirrossa (Inductive Power Transfer, IPT) magneettikentän avulla voidaan siirtää tehoa käytännöllisillä järjestelyillä tutkitusti ainakin 10 kW teholla esimerkiksi 400 mm pituisen ilmapälin ylitse [25]. Tämä mahdollistaa esimerkiksi ajoneuvon lataamisen liikennevaloihin pysähtyessä, mikäli tienpinnassa olisi lataava laite ja sähköajoneuvon pohjassa sopiva vastinalusta. Vaihtoehtoisesti pysäköintipaikalla olevan langattoman latauslaitteen avulla voitaisiin välttää latauspistokkeen kytkemisen vaiva. Käytännöllisyyden lisäksi johdottoman latauksen avulla voidaan parantaa latauksen turvallisuutta sekä vähentää ilkeivallan mahdollisuutta latauslaitteeseen, mikäli latauslaite olisi suojassa maanpinnan alapuolella.

Sähköajoneuvojen johdottomalle lataukselle (Wireless Power Transfer, WPT) on oma standardinsa IEC 61980-1:2015. Johdoton lataus on kuitenkin vielä suhteellisen uusi latausratkaisu sähköajoneuvoissa eikä se ole ehtinyt vakiintua, mikä näkyy langattomien latauslaitteiden tarjoajien sekä langatonta latausta tukevien sähköajoneuvojen määrässä. Muutamista markkinoilta löytyvistä langattomien latauslaitteiden valmistajista mainittakoon esimerkkinä Plugless. Plugless tarjoaa jo muun muassa BMW i3 ja Tesla Model S automalleihin induktiolatauksen mahdollistavaa latauslaitetta ja autoon tehtävää muokkausta, joiden avulla voidaan ladata ajoneuvoa 7,2 kW teholla [26].

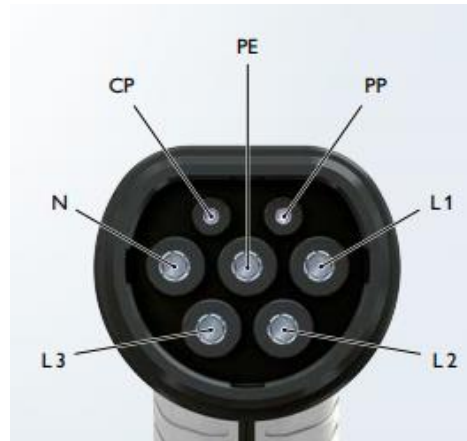
2.3.5 Akustonvaihtopalvelu

Sähköajoneuvoihin voidaan saada virtaa akkujen latauksen lisäksi akkuja vaihtamalla eli akkujenvaihtopalvelulla. Kyseinen palvelu perustuu siihen, että sähköautosta vaihdetaan tähän tarkoitettuun palvelupisteellä tyhjät akut täysinäisiin akkuihin hetkessä. Tällaisia ratkaisuja on ainakin muutamia toteutettu ja tarjolla. Esimerkiksi sähköautojen latausratkaisuja myynyt Israelilainen Better Place yhtiö on vuonna 2009 toteuttanut automaattisen sähköajoneuvojen akustojenvaihtoaseman, joka vaihtaa akuston 80 sekunnissa uuteen [27]. Yritys ei kuitenkaan saavuttanut riittävää menestystä ja hakeutui konkurssiin. Tämän taustalla oli muun muassa se, että akustojen mahdollistama ajomatka ei ollut kovinkaan pitkä [28]. Myös BattSwap on kehittänyt vastaavan automaattisen ratkaisun, jossa auton pohjassa oleva akku vaihdetaan alle minuutissa uuteen [29]. Lisäksi GreenWay on suunnitellut puoliautomaattisen akustojenvaihtoaseman, jossa akuston vaihto kestää noin 7 minuuttia [30]. Nämä akustojenvaihtopalvelut soveltuvat kuitenkin vain niitä varten suunnitelluille ajoneuvoille. Laajempi akustojen vaihtopalvelu edellyttäisi akkujen riittävää standardoimista sähköisiltä ominaisuuksilta sekä fyysisiltä mitoilta. Esimerkiksi akkujen integroitua ajoneuvon rakenteisiin kasvavassa määrin, tulee akkujen standardoiminen käytännössä olemaan hankalaa. [31]

2.4 Pistoketyypit

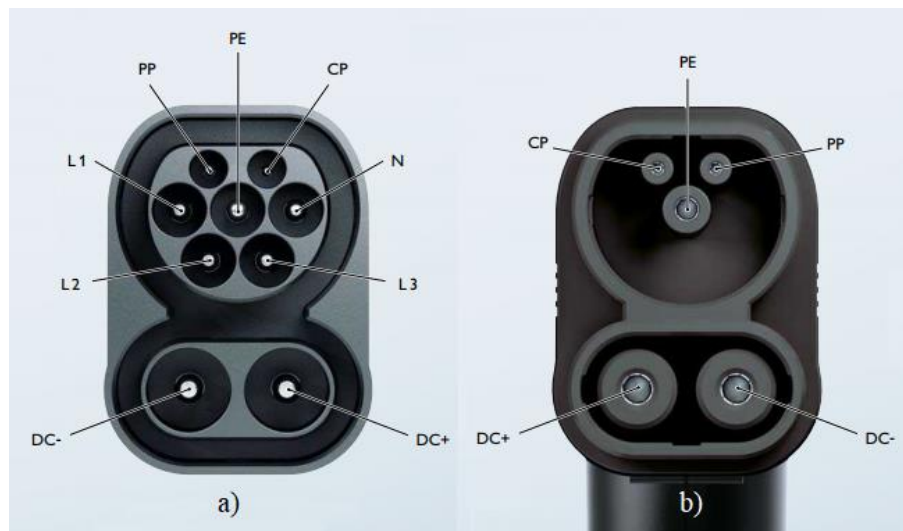
Sähköajoneuvojen lataukseen soveltuvat pistoketyypit on määritelty Standardissa SFS 6000-8-813. Hitaat lataustavat 1 ja 2 ovat mahdollisia toteuttaa käyttäen kotitalouspistorasiaa tai teollisuuspistorasiaa. Teollisuuspistorasian on kuitenkin oltava standardin SFS-EN 60309-2 mukainen ja kotitalouspistorasian on oltava maadoitettu, SFS 5610 standardin mukainen sekä pitkäaikaiselta latausvirralta rajoitettu tarpeeksi pieneksi. Puolinopealle vaihtosähkölataukselle, eli lataustavassa 3, on standardissa SFS-EN 62196-2 määritelty kolme eri pistoketyypistä: tyyppi 1 (type 1), tyyppi 2 (type 2) ja tyyppi 3 (type 3). Suomessa ja muualla Euroopassa on EU direktiivissä 2014/94/EU määrätty tyypin 2 pistoke käytettäväksi julkisissa latausasemissa. Sen sijaan tyyppi 1 on käytössä lähinnä Amerikassa ja Japanissa. Tyypin 3 latauspistoketta on käytetty pitkälti vain Italiassa ja Ranskassa, mutta sen käyttö on alkanut vähentyä 2014/94/EU direktiivin myötä. [17]

Tyypin 2 latauspistoke sisältää kappaleessa 2.3.2 mainitut signaalit CP ja PP, joiden avulla varmistetaan latauksen turvallisuus ja mahdollistetaan kuormanhallintaan vaadittava tiedonsiirto. Näiden lisäksi pistokkeessa on liittimet kolmelle vaiheelle, nollajohtimelle ja maadoitukselle. Kuvassa 5 on havainnollistettu tyypin 2 pistokkeen sisältämät liittännät. Tyypin 2 pistokkeesta käytetään epävirallisesti nimitystä ”Mennekes” sen kehittäneen valmistajan mukaan [32].



Kuva 5. Tyypin 2 latauspistoke [20].

Tasasähkölataukselle Euroopan komissio on määritellyt standardin IEC 62196 mukaisen CCS (Combined Charging System) tyypin 2 käytön. CCS yhdistelmäpistokkeessa hyödynnetään vaihtovirtalataustavan 3 maadoitusliitintä sekä CP ja PP liittimiä, mutta näiden lisäksi siinä on omat liittimet tasavirralla. Kuvassa 6 on esitetty CCS tyypin 2 ajoneuvovastake ja siihen sopiva latauskaapelin pistoke. [20]



Kuva 6. a) CCS tyypin 2 ajoneuvovastake, b) CCS tyypin 2 latauspistoke [20].

Kuten kuvista 5 ja 6 voidaan havaita, ajoneuvossa olevaa CCS tyypin 2 mukaista ajoneuvovastaketta voidaan käyttää sekä monikäyttöiseen puolinopeaan vaihtovirtalataukseen että suuritehoiseen tasasähkölataukseen.

2.5 Latauksen taustajärjestelmä

Julkiseen käyttöön tarkoitetuilta tai latauspisteiden lukumäärältään suurilta latausasemilta vaaditaan usein älykkyyttä kuormanhallintaan tai käyttäjän tunnistautumiseen. Kuormanhallinnan avulla varmistetaan kokonaislatausvirran pysyminen sallituissa

rajoissa, ja tunnistautumisen avulla mahdollistetaan lataustapahtumaan pääsyn oikeuttaminen ja latauksen käytöstä laskuttamisen. Nämä voidaan periaatteessa toteuttaa latauskeskuksessa paikallisesti, mutta esimerkiksi kappaleessa 2.2 mainitun latausjärjestelmän investointituen asettamien vaatimusten takia nämä käytännössä vaativat pilvipohjaisen järjestelmän. Tästä kuormanhallinnasta tai tunnistautumisesta vastaavasta järjestelmästä käytetään nimitystä taustajärjestelmä. Seuraavissa kappaleissa käsitellään tunnistautumista ja tiedonsiirtoa, joka tulee oleelliseksi latausjärjestelmän kannalta. Kuormituksen hallintaa käsitellään tämän jälkeen kappaleessa 2.6.

2.5.1 Tunnistautuminen ja laskutuksen periaate

Latausjärjestelmän käyttöä voidaan joissain tapauksissa perustellusti tarjota ilmaiseksi esimerkiksi asiakkaiden houkuttelemiseksi. Tällöin voi latausteho olla myös pienehkö, jonka tarkoituksena on saada asiakasta pitkittämään vierailua. Jos kuitenkin latauslaitteen käytöstä halutaan laskuttaa, tulee usein tarpeelliseksi myös jollain tavalla tunnistaa käyttäjä. Tunnistautumiselle on yleisesti ollut ehdolla RFID (Radio Frequency Identification) tunnistimen käyttö, tekstiviestillä tunnistautuminen tai mobiilisovellusta hyödyntävä ratkaisu. RFID tunnistus voidaan toteuttaa sijoittamalla esimerkiksi lataustolppaan sopiva RFID lukulaite, josta käyttäjän tunnistetiedot välitetään taustajärjestelmälle. Lataustolpassa voisi myös olla palvelunumero, johon lähettämällä tekstiviestin saa lataustapahtuman käyttöön. Vaihtoehtoisesti mobiilisovellusta hyödynnettäessä käyttäjällä voi olla henkilökohtainen tili, jonka avulla taustajärjestelmä pystyy yksilöimään käyttäjät sekä tuomaan tarvittavat toiminnot ja tiedot käyttäjälle. Mobiilisovelluksen puolesta puhutaankin paljon, sillä sen käytöllä voidaan käytännöllisin keinoin mahdollistaa toimintoja, kuten latauspisteen tilatietojen tarkistus ennen latauspaikalle menoa, latauspisteen varaus etukäteen ja latausprosessin edistymisen seuraus.

Latauksen käytön laskutuksen perusteena voi olla useita eri tapoja. Laskutus voidaan toteuttaa esimerkiksi ladatun energian mukaan tietyllä kilowattituntihinnalla, jolloin latauksen hinta on suoraan verrannollinen ladatun energian määrään. Vaihtoehtoisesti lataustapahtumaan voidaan antaa käyttöoikeus tietyllä kuukausi- tai kertamaksulla. Maksullisten parkkipaikkojen tapauksessa lataustapahtumaan pääsy voisi sisältyä kyseiseen parkkimaksuun. Tämä voisi soveltua erityisen hyvin keskustan lähistössä, jossa parkkimaksu saattaa olla suhteessa melko suuri verrattuna tyypillisen lataustapahtuman aikana verkosta otetun energian arvoon. Lataustapahtuma voidaan hinnoitella myös erikseen tehon mukaan niin, että tietyllä hinnalla on tietty tehoraja ja isompaa tehorajaa vastaa myös isompi hinta. Tehorajan sisältävä hinnoittelu on sähköverkon kuormituksen kannalta positiivinen vaihtoehto siinä, että tällöin asiakas saattaa valita itselleen halvimman ja samalla latausteholtaan pienimmän, mutta silti tarpeeseensa riittävän latausnopeuden. [9]

2.5.2 OCPP

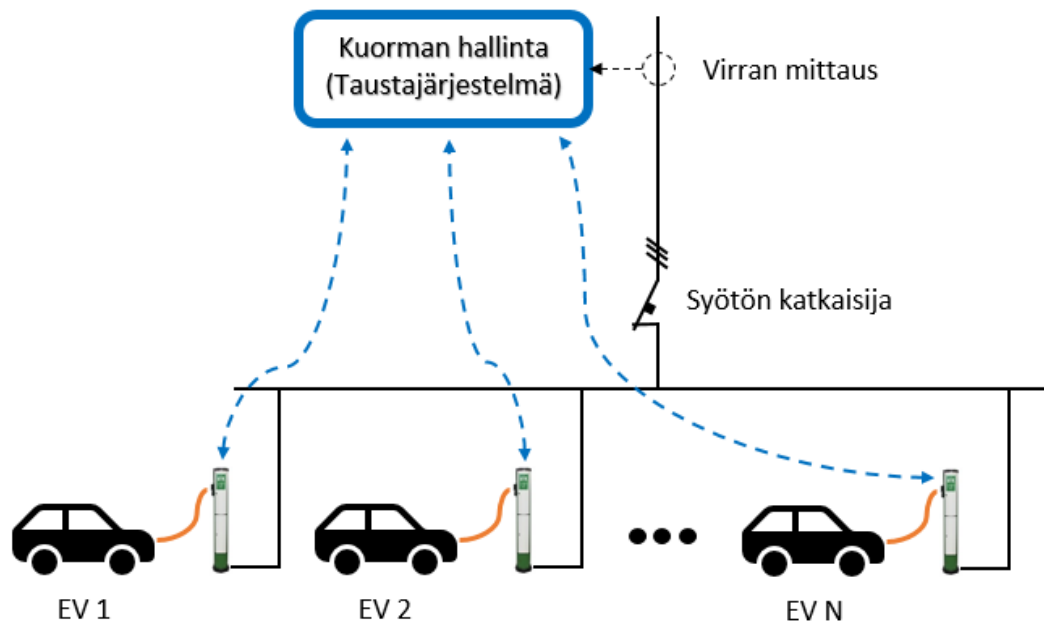
Taustajärjestelmää käytettäessä sen ja latausaseman tai yksittäisen latauspisteen välillä tarvitaan tiedonsiirtoa mahdollisen kuormituksen hallintaan tai tunnistautumisen käsittelyyn. Jotta kaikki valmistajat eivät kehittäisi omaa protokollaa tälle tiedonsiirrolle, on Open Charge Alliance (OCA) kehittänyt avoimen rajapinnan Open Charge Point Protocol (OCPP) ratkaisuna tähän. Tämä avoin rajapinta houkuttelee latausjärjestelmän hankkijoita sillä, että he eivät tällöin sitoudu tietyn valmistajan latauslaitteisiin tai tiettyyn taustajärjestelmään. OCPP -rajapintaa hyödyntävän latausjärjestelmän päivittämisessä voidaankin siis esimerkiksi jälkikäteen lisätä eri valmistajan latauspisteitä huomattavasti suoraviivaisemmin, kun myös uudet lisäykset tukevat samaa OCPP versiota.

Tämän työn aikana uusin valmis versio OCPP 1.6 on ensimmäinen, jossa käsitellään myös kuormanohjausta [33]. OCPP 1.6 määrittelee pitkälti kaikki lataustapahtumassa tarvittavat tapahtumat, joista esimerkkinä mainittakoon tunnistautuminen, latauspisteen varaaminen ja latausprofiilin asettaminen. Kuten aiemmin mainittiin, kuormanohjaus on edellytys lataustuen saannille. Tämä on oletettavasti ratkaiseva tekijä sekä yleiseen kiinnostukseen tätä avointa rajapintaa kohtaan ja juuri OCPP 1.6 versiota kohtaan. OCA on julkaissut 14.12.2017 uusimman version OCPP 2.0 julkisen luonnoksen [34]. Kyseisessä versiossa on tulossa päivitys muun muassa latausaseman seurantaan, järjestelmän tietoturvaan ja kuormanhallintaan liittyviin toimintoihin [34]. Tämä on kuitenkin vielä keskeneräinen eikä ole vielä saanut erityistä huomiota, joten se jätetään tässä työssä vähemmälle huomiolle. Tämän työn sisällä taustajärjestelmästä puhuttaessa tarkoitetaan jatkossa sekä pilvipalvelua että OCPP 1.6 versiota hyödyntävää ratkaisua.

2.6 Kuormituksenhallinta

Usean latauspisteen muodostaman latausaseman kaikkien latauspisteiden yhteenlaskettu teho voi helposti nousta hyvinkin korkeaksi. Sähkökeskuksissa on tyypillistä käyttää päävirtapiirien lukumäärän mukaan tasoituskerrointa, jonka tarkoituksena on välttää ylivoimaisuutta. Tämä tasoituskerroin voi esimerkiksi SFS-EN 61439 mukaan olla 0,5 kiinteistökeskukselle, johon liittyy yli kymmenen päävirtapiiriä. Sähköajoneuvojen latauksessa tulee kuitenkin standardin SFS 6000-7-722 mukaisesti käyttää tasoituskerrointa 1, mikäli käytössä ei ole kuormituksen hallintaa, eli syöttö pitää mitoittaa kaikkien latauspisteiden maksimitehojen summan mukaan. Tämä voidaan toteuttaa hyvin suurilla kaapeleilla, sulakkeilla ja omalla suuremmalla sähköliittymällä, joiden avulla latausjärjestelmä kestää suuretkin virrat ja tehot. Käytännössä lataustehot voivat kuitenkin olla maksimiarvojansa reilusti alhaisempia suurimman osan ajasta, eikä jokaisella latauspisteellä ole aina ajoneuvoa latautumassa, joten tämän ääritapauksen mukaan mitoittaminen on usein hyvin epäedullinen kustannustehokkuuden kannalta. Taloudellisemman mitoituksen mahdollistamiseksi on kannattavaa rajoittaa latausaseman kokonaistehoa.

Kokonaistehon rajoittamiselle on useita eri vaihtoehtoja. Kuvassa 7 on esitetty rakenteen pääperiaate, jossa kuormanohjausta varten mitataan syötön kokonaisvirtaa ja jokaisen latauspisteen latausvirta. Näiden mittausten tiedot välitetään kuormanhallintaa varten taustajärjestelmälle lähes reaaliajassa. [18]



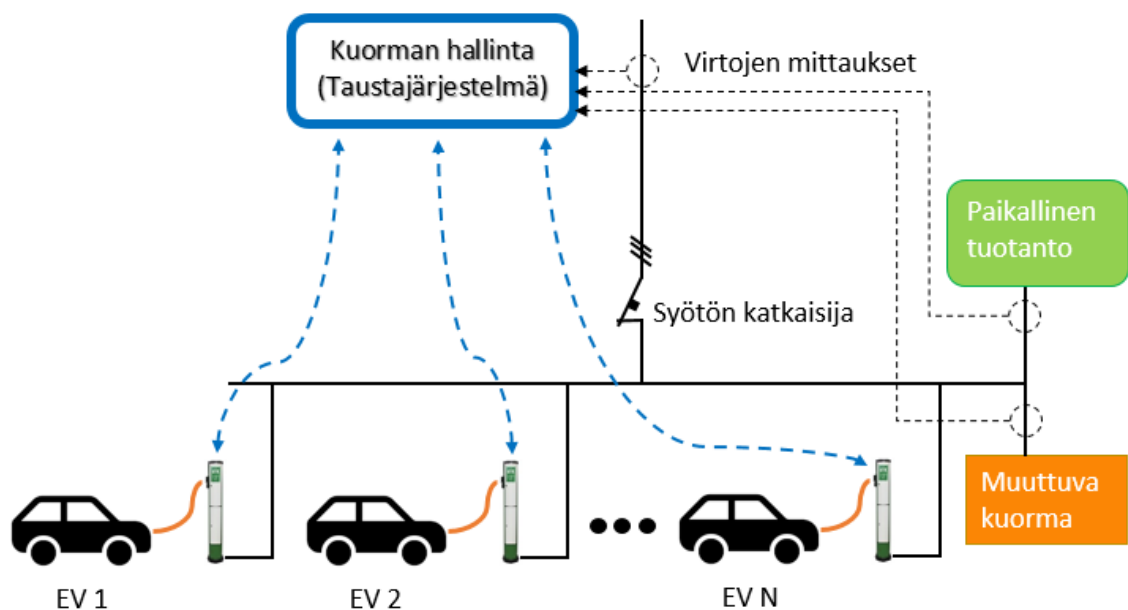
Kuva 7. Kuormanhallinnan periaate latauspisteiden ryhmälle. Muokattu lähteestä [18].

Kuvan 7 latauspisteet muodostavat yhden ryhmän, jossa kaikkien latauspisteiden yhteistehoa pitää rajoittaa esimerkiksi näiden syöttökaapelin mitoituksen mukaan. Tämä on odotettavissa oleva tyypillisin tilanne, joka latausaseman kuormanhallinnassa tulee vastaan. Vaikka latausasemaan liittyvien latauspisteiden kokonaistehonrajaus onkin taustajärjestelmän vastuulla, voi latauspisteiden tehonjako tapahtua myös latausasemassa olevassa älyssä tai tiettyä latauspisteiden ryhmää ohjaavassa latauspisteessä. Tällaisista latauspisteistä, jotka ohjaavat muita latauspisteitä sekä välittävät tietoa näiden muiden latauspisteiden ja taustajärjestelmän välillä, käytetään nimitystä ”master” ja sen ohjaamista latauspisteistä nimitystä ”slave”.

2.6.1 Ulkoisista tekijöistä riippuva tehoraja kuormanhallinnassa

Sähköajoneuvojen latausjärjestelmän yhteydessä voidaan hyödyntää paikallista tuotantoa yksinkertaisimmillaan vähentämään verkosta otetun energian määrää. Tällöin verkosta otettu teho on kuorman suuruuden ja paikallisen tuotannon tehon erotus, jonka seurauksena verkosta otettava teho saavuttaa maksiarvonsa vain, kun paikallinen tuotanto alhaalla ja kuormitus maksimissaan. Vaihtoehtoisesti paikallisella tuotannolla voidaan mahdollistaa verkkoliittymän rajoittamaa tehoa suurempi kokonaislatausteho. Tämä tuo kuitenkin järjestelmään lisää huomioitavia tekijöitä, jos paikallinen tuotanto on

esimerkiksi aurinkosähköä tai tuulivoimaa, jossa tuotanto vaihtelee ulkoisten tekijöiden seurauksena. Vastaavasti rinnakkainen muuttuva kuorma voi aiheuttaa samanlaisen tapauksen, sillä sallitussa kokonaislataustehossa voidaan olettaa ulkoisen kuorman olevan koko ajan maksimissaan tai siihen voidaan reagoida dynaamisesti. Joissain tilanteissa suurimman ulkoisen kuorman asettamien rajoitteiden kanssa toimiminen voi vähentää huomattavasti potentiaalista kokonaislataustehoa, minkä johdosta dynaaminen reagointi voi tulla tarpeeseen. Muuttuvan rinnakkaisen kuorman tilanne voisi tulla vastaan esimerkiksi kerrostalossa, jossa sähköajoneuvojen lataukseen syötetään virtaa sen mukaan mitä asukkaiden kulutuksen ja sähköliittymän pääsulakkeiden perusteella voidaan. Kuvassa 8 on havainnollistettu tilannetta, jossa kuormanhallinnan on otettava ulkoiset muutokset huomioon.



Kuva 8. Ulkoiset tekijät sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä.

Tyypillisessä tapauksessa, jossa sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä ei ole paikallista tuotantoa eikä samaan syöttöön liity muuta kuormaa, lataustarpeen muutoksiin ei tarvitse reagoida nopeasti. Lataustapahtumien päättymiseen tai lataus virtojen vähentymiseen voidaan reagoida kohtuullisellakin viiveellä, sillä tällöin ollaan sallitun kokonaisvirran alapuolella ja ainoa haitta voi olla potentiaalisen lataustehon hyödyntämisen menetys. Ainoa muutos, joka vaatii muiden lataustapahtumien virtojen pienentämistä, on uuden lataustapahtuman alkaminen. Koska uusi lataustapahtuma voidaan pitää virrattomana tarvittaessa pitkäänkin, muiden lataustapahtumien virtoja ehditään huoletta laskemaan tarvittava määrä.

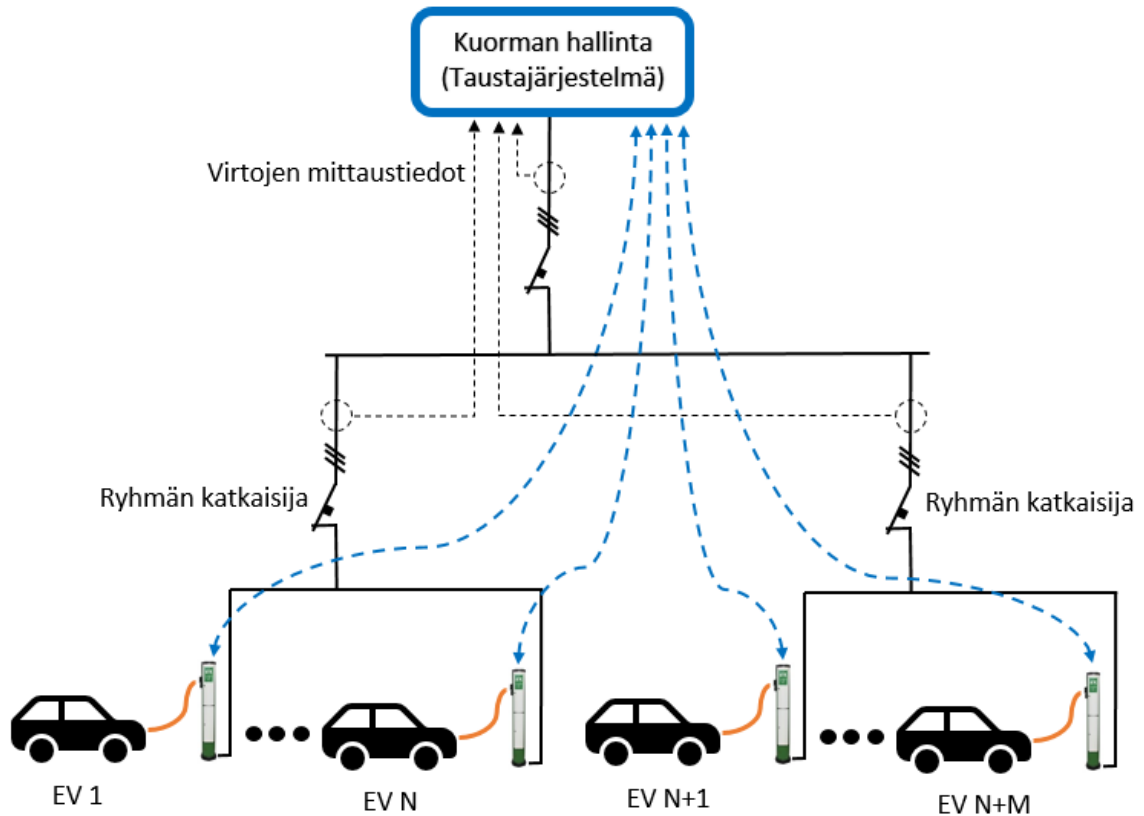
Mikäli järjestelmän sähköajoneuvojen lataustapahtumille tarkoitettu sallittu kokonaisteho riippuu ulkoisista dynaamisista tekijöistä, kuten paikallisen tuotannon tehosta tai rinnakkaisen kuorman suuruudesta, on näitä ulkoisia tekijöitä varten oltava jatkuva mittaus ja nopea mittaustietojen siirtoyhteys kuormanhallinnalle. Kuormanhallinnan on

tarvittaessa tehtävä ratkaisu kokonaistehon rajoittamiseksi nopeasti ja välitettävä latauspisteille uudet tehorajat. Tiedonsiirtoviiveiden ohella on huomioitava sähköajoneuvojen reagointinopeus. Standardin IEC 61851 mukaan sähköajoneuvojen maksimi sopeutumisaika uuteen virtarajaan on 5 sekuntia. Normaalin operoinnin aikana sähköajoneuvon latauslaitteen ei tulisi aloittaa uutta sopeutumistapahtumaa uuteen virtarajaan tuon viiden sekunnin aikana. Useimmissa tapauksissa tämä ei muodostuisi ongelmaksi, sillä esimerkiksi SFS-EN 60269-1 mukaisten gG-sulakkeiden alempi toimintarajavirta tunnin ajalla on $1,25 I_N$. Tämä siis tarkoittaisi esimerkiksi sitä, että jos järjestelmän verkosta ottama maksimivirta olisi 400 A ja aurinkosähkön avustuksella saatava lisävirta tippuisi hetkessä 100 ampeerista nolnaan, niin järjestelmällä olisi tunti aikaa sopeutua uuteen virtarajaan.

Älykkäässä latausasemassa tehoraja voi myös riippua sähköverkon kuormituksen tilanteesta, jolloin se pystyy osallistumaan kysyntäjoustoon. Eräs keino olisi rajata latausaseman kokonaislataustehoa pienemmäksi, kun sähköverkon taajuus laskee alle tietyn arvon. Tästä esimerkkinä mainittakoon Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa toteutettu projekti, jossa yksittäisen latauspisteen teho rajoitettiin minimiin verkon taajuuden laskiessa alle 49,98 Hz [35]. Ladattavana autona toimi Volvo XC60, jonka reagointinopeus edellä mainittuun rajaan havaittiin olevan noin 3 sekuntia. Vaihtoehtoisesti latausaseman tehoa voitaisiin mahdollisesti laskea jakeluverkon paikallisen ylikuormituksen välttämiseksi, mikäli taustajärjestelmän ja jakeluverkko-yhtiön välillä olisi soveltuva automaattinen kommunikointiyhteys.

2.6.2 Useamman latauspisteiden ryhmän sisältävä järjestelmä

Joissain tilanteissa, kun latauspisteiden lukumäärä nousee riittävän suureksi, saattaa järjestelmän kannalta tulla tarpeelliseksi muodostaa latauspisteistä useampi ryhmä. Yhden ryhmän sisällä tulee mitoituksessa ottaa huomioon kaikki mahdolliset eri latauspisteiden lataustilanteet ja varmistaa, että latauspisteitä syöttävät kaapelit ovat riittävän suuret. Jakamalla latauspisteitä omiin ryhmiin voidaan niissä olevien latauspisteiden yhteenlaskettua maksimilataustehoa ohjata erikseen, jolloin voidaan niihin tuleva syöttö mitoittaa pääsyöttöä pienemmäksi ja siten parantaa kustannustehokkuutta. Kuvassa 9 on havainnollistettu järjestelmää, joka koostuu kahdesta latauspisteiden ryhmästä, joissa on N ja M kappaletta latauspisteitä.



Kuva 9. Alaryhmien kuorman hallinta.

Kuvan 9 tapauksessa pääsyöttö jaetaan kahdelle ryhmälle ja nämä ryhmät rajoittavat tarvittaessa niissä olevien latauspisteiden tehoa. Tällöin näille ryhmille menevä syöttökaapeli voidaan mitoittaa ryhmän kuormanhallinnassa käytettävän tehon mukaan, ja pääsyötön mukaan tarvitsee mitoittaa vain näille ryhmille menevä syöttökaapeli. Pääsyöttö tulee kuitenkin olla mitoitetu vähintään siinä olevien ryhmien yhteenlasketun maksimilataustehon mukaan. Esimerkiksi parkkihallista voisi löytyä latauspisteitä eri kerroksissa tai muutoin jonkin välimatkan päästä toisistaan, jotka silti liittyvät samaan pääsyöttöön. Eri kerroksissa olevien latauspisteiden tapauksessa kukin kerros voitaisiin kuormanhallinnassa tehtävän ryhmittelyn perusteella mitoittaa kaapeleiltaan näiden kerrosten yhteenlaskettua tehoa pienemmän tehon mukaan. Esimerkin mukaisessa ryhmittelyssä on kuitenkin hyvä huomioida myös epätasainen latauspaikkojen suosio. Mikäli monikerroksisessa parkkihallissa ensimmäinen kerros täyttyy aina ensin, voi yhden ryhmän kokonaislatausteho olla maksimissaan samalla, kun muut ryhmät ovat käyttämättöminä. Tällöin ryhmittelyn seurauksena koko parkkihallille tarkoitettu latausteho jää osa hyödyntämättä.

2.6.3 Latauspisteiden tehonjako

Kokonaistehon rajoittamiseksi voidaan latauspisteiden tehoa jakaa usealla eri tavalla. Tehoa voidaan antaa esimerkiksi tasapuolisesti jokaiselle vähemmän. Vaihtoehtoisesti latausta voitaisiin jakaa sen hetkisen lataustapahtuman aloitusajan mukaan, jolloin esimerkiksi ensimmäisenä tullutta priorisoidaan enemmän. Tehonjako voisi myös riippua lataustapahtumassa siirretystä energiasta niin, että kullekin ajoneuvolle pyritään saamaan tasaisesti virtaa matkan jatkamista varten. Tehonjako voisi myös priorisoida eri lataustapahtumia hintaryhmän mukaan siten, että esimerkiksi suuremmasta lataustehosta maksaville jaettaisiin myös enemmän tehoa tilanteissa, joissa kaikille ei riitä ajoneuvon ottamaa maksimivirtaa. Hienostuneempia tehonjakoalgoritmeja on myös mahdollista toteuttaa, mutta tietojen puute voi rajoittaa näitä mahdollisuuksia. Esimerkiksi tietoa akun varaustasosta (State Of Charge, SOC) tai ajoneuvon suunnitellusta lähtöajasta voitaisiin käyttää tehojaon optimoinnissa. [9]

Latauspistekohtaisesti tehoa voidaan säätää ainakin kahdella tavalla, kun kokonaisteho on muutoin ylittymässä. Lataus voidaan kytkeä hetkellisesti pois päältä, jolloin esimerkiksi uudelle lataustapahtumalle riittää virtaa. Näitä latauksen keskeytyksiä tulisi tarvittaessa kierrättää latauspisteeltä toiselle halutulla suhteella, jotta tehoa saadaan jokaiselle latauspisteelle. Tämä on tyypillisesti ainoa vaihtoehto hitaalle lataustavalle 2. Joissain tilanteissa tämä voi olla ongelmallista, koska kaikki lataustapaan 2 tarkoitetut virranohjauslaitteet eivät jatka lataamista pienen jännitteettömän jakson jälkeen. Lataustavat 3 ja 4 mahdollistavat virran rajoituksen katkaisematta latausprosessia, kuten kappaleissa 2.3.2 ja 2.3.3 mainittiin. Näiden tapauksessa halutun tehonrajausperiaatteen toteuttaminen on selkeämpää, kunhan latausjärjestelmän sallittu kokonaisteho on suurempi kuin sen latauspisteiden määrän ja niiden minimitehon tulo, jotta latauspisteiden syöttöä ei tarvitse katkaista ollenkaan. Koska tässä työssä tarkasteltava järjestelmä hyödyntää lataustapaa 3 ja sallittu kokonaislatausteho oletetaan riittävän suureksi, ei latauspisteiden syöttöä tarvitse katkaista tehon rajoittamiseksi. [18]

Kuormituksenhallinnassa on myös huomioitava se tosiasia, että vain tieto sallitusta maksimivirrasta välittyy ladattavalle ajoneuvolle. Latauslaite tai kuormanhallinta ei saa ladattavalta ajoneuvolta suoraan tietoa lataustapahtuman virrantarpeesta. Kuormanhallinta voi esimerkiksi asettaa virtarajaksi 16 ampeeria, mutta ladattava ajoneuvo hyödyntääkin vain 10 ampeeria. Täyden kuormituksen tilanteessa, jossa kaikille lataustapahtumille on annettu sama virtaraja, mutta osa ei hyödynnä kaikkea ja osa voisi hyödyntää enemmänkin, menee potentiaalista kokonaislataustehoa hukkaan. Tätä ongelmaa on havainnollistettu taulukossa 2. Yksinkertaistuksen vuoksi tässä esimerkissä oletetaan tehonjaon pyrkivän tasapuoliseen lataustehoon latauspisteiden välillä.

Taulukko 2. Esimerkki lataustapahtumien virtarajoista.

	EV 1	EV 2	EV 3	EV 4	EV 5	Yht.
Suurin hyödynnettävä virta	10 A	10 A	10 A	32 A	32 A	94 A
Epäoptimaalinen virtaraja	16 A	16 A	16 A	16 A	16 A	80 A
Epäoptimaalinen toteutuma	10 A	10 A	10 A	16 A	16 A	62 A
Järjestelmän tavoite	10 A	10 A	10 A	25 A	25 A	80 A

Taulukon 2 esimerkissä lataustapahtumien hetkellinen kokonaislatausvirta voisi olla 94 A maksimissaan, mutta latausjärjestelmä asettaa tähän 80 A maksimirajoituksen. Mikäli tämä 80 A jaettaisiin näiden viiden esimerkissä olevien lataustapahtumien kesken, saadaan jokaiselle virtarajaksi 16 A. Ilman lisätietoa tämän optimointi on käytännössä mahdotonta ja esimerkin mukainen tilanne hyödyntäisi vain 62 A eli 77,5 % sallitusta kokonaislatausvirrasta. Ratkaisuna tähän voisi olla latauspistekohtaisen virtamittauksen hyödyntäminen, jonka avulla saatu tieto toteutuvasta virrankulutuksesta voidaan välittää kuormanhallinnalle. Tällöin kuormanhallinta voi tehdä päätöksiä lataustapahtumien virtojen tarpeista ja mahdollisesti vapauttaa suurempaa virtaa hyödyntäville lataustapahtumille kapasiteettia niiltä, jotka eivät hyödynnä niille asetettua virtarajaa kokonaan. Esimerkin tapauksessa täydellinen tilanne olisi koko 80 A hyödyntäminen, mutta käytännössä tähän liittyy kuitenkin haasteita, mikäli lataustapahtumille halutaan jakaa kapasiteettia tasapuolisesti tai kapasiteetin jaossa halutaan noudattaa jotain muuta selvää logiikkaa. Jos esimerkiksi kuormanhallinnan tarkoitus on jakaa kapasiteettia tasapuolisesti ja ”EV 1” voisi alkaa hyödyntämään suurempaa virtaa ”Järjestelmän tavoite”-tilanteessa, ei kuormanhallinnalla ole välttämättä keinoa saada tätä tietoon. Tällöin haluttu kapasiteetinjakoperiaate voi jäädä toteutumatta. Erästä ratkaisua, jossa kuormanhallinta voi päätellä latauspisteiden tehotarpeita, on havainnollistettu taulukossa 3.

Taulukko 3. Esimerkki lataustapahtuman älykkäämmistä virtarajoista.

	EV 1	EV 2	EV 3	EV 4	EV 5	Yht.
Suurin hyödynnettävä virta	10 A	10 A	10 A	32 A	32 A	94 A
Esimerkki ratkaisu virtarajoille	11 A	11 A	11 A	23,5 A	23,5 A	80 A
Esimerkki toteuma	10 A	10 A	10 A	23,5 A	23,5 A	77 A
Järjestelmän tavoite	10 A	10 A	10 A	25 A	25 A	80 A

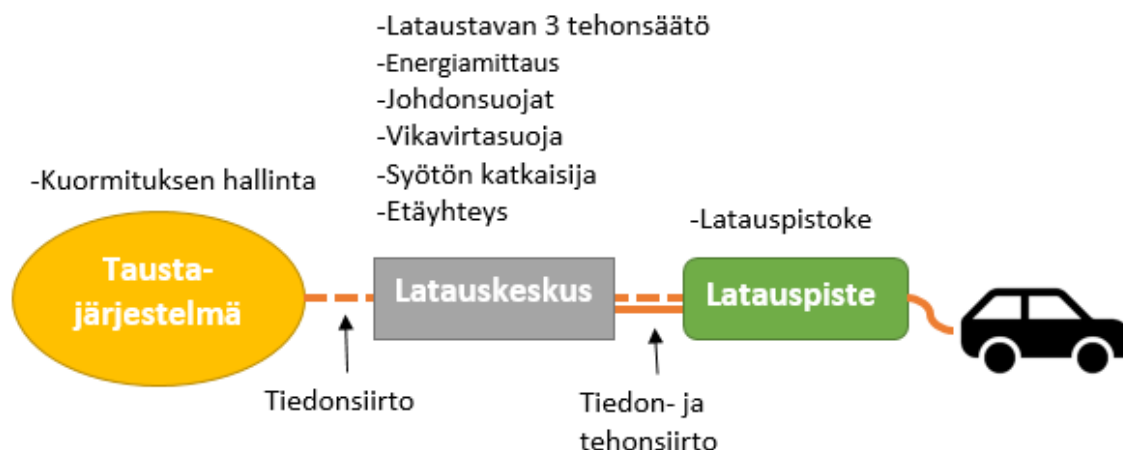
Tässä ratkaisussa kuormanhallinta hyödyntää latauspistekohtaisia virran mittaustietoja ja asettaa latauspisteille virtarajan mittaustietojen avulla saadun toteuman suuremmalle

puolelle pienen marginaalin verran, joka tässä esimerkissä on selkeyden vuoksi 1 A. Tällöin järjestelmä voi seurata toteutuvaa latausvirtaa ja päätellä, mikäli lataustapahtuma voisi hyödyntää suurempaa virtaa. Esimerkiksi taulukon 3 tilanteessa taustajärjestelmä voi hyvin olettaa ladattavien ajoneuvojen ”EV 4” ja ”EV 5” pystyvän hyödyntämään suurempaa virtaa kuin 23,5 A, mutta ei kokonaisvirtarajoituksen vuoksi voi sitä sallia. Vastaavasti kuormanhallinta voisi asettaa pienemmän virtarajan, mikäli lataustapahtuman virta on selvästi alle sen hetkisen virtarajan. Jos esimerkiksi ladattavan ajoneuvon ”EV 1” ottama virta laskee alle 9 A, voi kuormanhallinta laskea sen virtarajan 10 A ja näin vapauttaa kapasiteettia muille lataustapahtumille. Jos vastaavasti saman lataustapahtuman ottaman virran noustessa virtarajaan 11 A asti, voi järjestelmä tällöin tarkastaa, mikäli halutun kapasiteetinjakoperiaatteen mukaan voidaan toisista lataustapahtumista vapauttaa kapasiteettia tälle lataustapahtumalle. Tämän esimerkin tapauksessa kyseisessä tilanteessa voitaisiin hyödyntää 77 A eli 96,25 % sallitusta kokonaislatausvirrasta. Olettaen, että ladattavat sähköajoneuvot voivat hyödyntää latausvirtaa portaattomasti 6 ampeerin ja hetkellisen maksiminsa välillä, voidaan virtamarginaalia pienentää laitteiden mittaustarkkuudesta riippuen pienemmäksi.

2.7 Latauskeskusmalli

Usean latauspisteen sisältämä latausjärjestelmä voidaan toteuttaa yksittäisistä latauspisteistä, jotka sisältävät kaikki tarvittavat komponentit tehonsäätöön ja suojaukseen sekä yhteyden taustajärjestelmään kuorman ohjausta varten. Tämä ratkaisu ei kuitenkaan ole ainoa tapa eikä välttämättä aina myöskään kustannustehokkain tai käyttövarmin. Latauskeskusmallin ideana on siirtää osa tietyn latauspisteryhmän ”älystä” tai jopa kaikki ”äly” latauskeskukseen, josta sitten kulkee tehonsiirtokaapelit ja tietoväylät näille ”tyhmille” lataustolpille. Latauskeskukseen on siis tarkoitus sisällyttää toimintoja, kuten yhteys taustajärjestelmään, latauspisteen tehonsäätö, energian mittaus, vikavirta- ja johdonsuojaus. Ääritapauksessa lataustolppaan jää vain latauspistoke, mikä on yhdistetty tarvittavilla kaapeleilla latauskeskukseen. Mikäli tunnistautuminen toteutetaan RFID:n (Radio Frequency Identification) avulla, tarvitaan latauspisteeseen kyseinen lukija ja siihen sopiva tietoväylä siirtämään tieto keskukselle.

Latauskeskusmallin mukainen latausjärjestelmä koostuu taustajärjestelmästä, älykkäästä latauskeskuksesta ja yksinkertaistetusta latauspisteestä. Kuvassa 10 on havainnollistettu osien yhteyttä keskenään latausjärjestelmässä, jossa kaikki ”äly” on sijoitettu latauskeskukseen. Taustajärjestelmän ja latauskeskuksen välissä on vain tiedonsiirtoa, ja muiden välillä on lisäksi tehonsiirtoa.



Kuva 10. Sähköajoneuvojen latauslaitteistojen toiminnot latauskeskusmallissa.

Taustajärjestelmä pitää tiedossa latauskeskuksen suurimman sallitun kokonaistehon ja saa latauskeskukselta pienin aikavälein tiedon latauspisteiden lataustehoista. Kokonaistehon ylittämiseksi taustajärjestelmä päivittää tarvittaessa latauskeskukselle uudet pienemmät latauspisteiden lataustehot, jotka välitetään kyseisten latauspisteiden tehonsäätimille. Latauspisteen ja sähköajoneuvon välillä kulkee aiemmin mainitut CP ja PP signaalit lataustapahtumaa varten tarvittavaa informaatiota varten. Mikäli latauspistettä varten toimiva tehonsäätö on latauskeskuksessa, kulkee CP ja PP signaalit vielä latauspisteeltä latauskeskukselle. Tehonsäädön ja taustajärjestelmän välillä on käytettävä OCPP 1.6 mukaista kommunikointia tukevaa tietoväylää.

Latauskeskusta hyödyntämällä voidaan tapauksesta riippuen mahdollisesti säästää investointikustannuksissa ja helpottaa vian korjaukseen sekä huoltoon liittyviä toimia. Latauskeskuksen avulla voidaan myös toteuttaa hyvin yksinkertaisia ja siten myös pienirakenteisia latauspisteitä, koska latauspisteessä ei välttämättä tarvitse olla kuin latauspistorasia. Tällöin latauspisteen integroiminen esimerkiksi olemassa oleviin rakenteisiin on tarvittaessa helpompi toteuttaa eikä tilaa vievää lataustolppaa välttämättä tarvita.

3 Aurinkosähkö- ja akustojärjestelmä osana latauskeskusta

3.1 Aurinkosähkö

Auringosta saatavan uusiutuvan energian hyödyntäminen on ollut näkyvästi kasvussa viime vuosina. Aurinkosähkön houkuttelevuutta on parantanut aurinkopaneelien teho-hinta -suhteen kasvu, aurinkoenergian tukeminen [36] ja ympäristöystävällisen ajattelun lisääntyminen. Vuonna 2015 maailmanlaajuinen aurinkosähkökapasiteetti kasvoi melkein 25 % edeltävästä vuodesta noin 227 GW:iin [37]. Suomessa aurinkosähkön osuus on marginaalinen muuhun tuotantoon ja jopa muihin uusiutuviin sähköntuotantomuotoihin verrattuna. Aurinkosähkön kapasiteetin on kuitenkin uutisoitu jopa kolminkertaistuneen vuoden 2016 aikana noin 27 MW:iin [38]. Kapasiteetti voidaan jaotella koostuvan suuremmista aurinkovoimaloista ja katoille asennetuista pienemmistä järjestelmistä. Vuonna 2014 noin puolet globaalista aurinkosähkökapasiteetista tuli talojen ja kiinteistöjen katoille asennetuista järjestelmistä [39].

3.1.1 Aurinkosähkön mitoituksessa huomioitavat tekijät

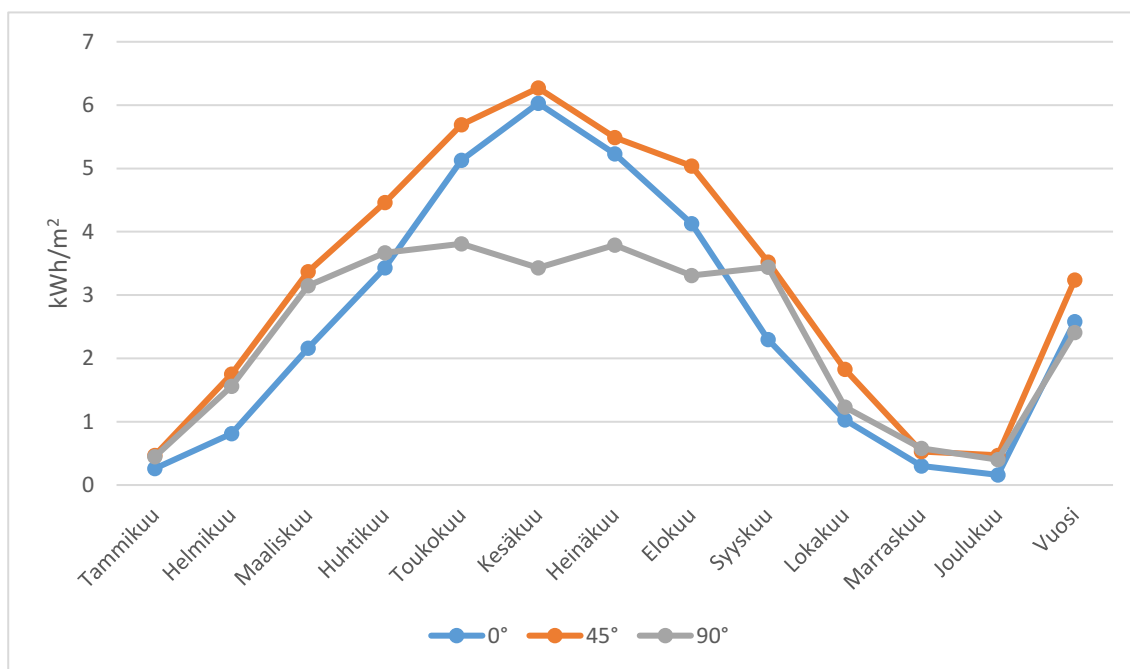
Aurinkosähkön tuottoon vaikuttaa useita tekijöitä, kuten aurinkopaneelien sijainti, kallistuskulma, suuntaus sekä niiden lämpötila. Näiden lisäksi tuotettuun energiaan vaikuttaa luonnollisesti sääolosuhteet, vuodenaika ja vuorokaudenaika. Myös käytettävällä aurinkopaneelityypillä ja sen hyötysuhteella on vaikutus saatavaan energian tuottoon. Esimerkiksi tutkimuksessa [40] on saatu hyötysuhteiksi a-Si ohutkalvo-paneelille 4,8 %, monikiteiselle piikennolle 11,4 % ja yksikiteiselle piikennolle 13,3 %.

Aurinkosähköjärjestelmän sijainnilla on selkeä yhteys havaittuun säteilyn intensiteettiin. Suomessa saatavaa auringonsäteilyn määrää on havainnollistettu taulukossa 4. Taulukon arvot ovat Ilmatieteen laitoksen mittaamia kohteissa, joissa paneelien suuntaus on ollut etelään [41;42]. Näistä arvoista on helposti nähtävissä pohjoisemman sijainnin vähentävän potentiaalista aurinkosäteilyn intensiteettiä.

Taulukko 4. Paneelin kallistuskulman vaikutus Suomessa.

	Kallistuskulma 0°	Kallistuskulma 45°	Kallistuskulma 90°
Etelä-Suomi	980 kWh/m ²	1211 kWh/m ²	878 kWh/m ²
Keski-Suomi	890 kWh/m ²	1127 kWh/m ²	843 kWh/m ²
Pohjois-Suomi	790 kWh/m ²	1032 kWh/m ²	794 kWh/m ²

Aurinkopaneelien asennuskulma vaikuttaa luonnollisesti sen pintaan osuvan säteilyn määrään ja näin myös energiantuottoon. Tämä voidaan havaita myös taulukosta 4 tai kuvasta 11, jossa on Etelä-Suomessa mitattuja arvoja kuukausien keskiarvoisille vuorokauden säteilymäärille yksikössä kWh/m². Maksimaalisen vuotuisen energiantuoton kannalta optimaalinen asennuskulma on lähes sama kuin sijainnin leveysaste noin 45° leveysasteelle asti, jolloin maahan tuleva säteily on pääosin suoraa säteilyä. Suoran säteilyn lisäksi paneeleihin saapuva säteily koostuu hajasäteilystä ja mahdollisesti heijastuvasta säteilystä, joiden merkitys keskimäärin kasvaa, kun mennään kauemmas päiväntasaajalta [43]. Leveysasteen 45° jälkeen, kuten Suomessa ja muualla Pohjois-Euroopassa, suoran säteilyn määrä ei ole enää dominoiva tekijä, vaan hajasäteilyn määrä on myös vaikuttava tekijä. Näillä alueilla hajasäteilyn suuri osuus maahan saapuvasta kokonaissäteilystä, arviolta noin puolet, on seurausta runsaasta pilvisyydestä. Hajasäteily tulee suurilla leveysasteilla pienemmästä kulmasta kuin auringon suora säteily, mikä näin ollen laskee vuotuisen energiantuoton kannalta optimaalista kulmaa hieman leveysastetta pienemmäksi. Käytännöllisistä syistä kalteville katoille sijoitettavien paneelien asento ja suuntaus määräytyy kuitenkin hyvin usein katon mukaan eikä niinkään parhaan energiantuoton mukaan. Optimaaliseen paneelien asentoon vaadittavien kattokiinnikkeiden hinta tulisi huomattavasti suuremmaksi ja katon suuntaiset paneelit ovat usein esteettisempi vaihtoehto. [44–46]



Kuva 11. Etelä-Suomessa mitatut auringon säteilyenergiat eri kallistuskulmilla [42;47].

Vuotuisen energian tai muun tietyn aikavälin mukaan optimaaliseen kiinteään kulmaan asennettu paneeli on kuitenkin suuren osan ajasta kaukana hetkittäisestä optimiasennosta johtuen auringon suhteellisen sijainnin muutoksesta vuorokauden edetessä. Seurantajärjestelmillä voidaan toteuttaa yhden tai kahden akselin suhteen ympäri kääntyvä järjestelmä niin, että sen paneeleihin osuvan säteilyn intensiteetti olisi

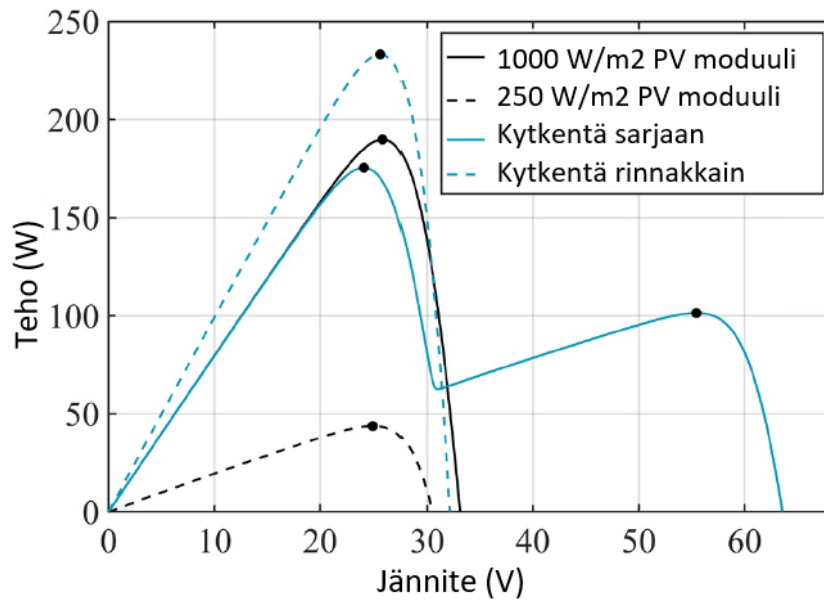
optimaalisempi koko tarkasteltavan jakson ajan. Kaksiakselisella seurantajärjestelmällä on havaittu saatavan jopa 50 % enemmän energiaa paneelin pinta-alaa kohden [48–50]. Yksiakselisilla järjestelmillä on esimerkiksi lähteessä [50] toteutetun mittauksen mukaan saatu 37.53 % enemmän energiaa Itä-Länsi suuntaisella seurannalla, 34.43 % pystyakselin ja 15.69 % Pohjoinen-Etelä suuntaisella seurannalla. Suuremmasta energiantuotosta huolimatta seurantajärjestelmät eivät ole aina taloudellisesti kannattavia. Niiden vaatimien komponenttien kustannukset tulevat usein huomattavan kalliiksi suhteessa koko järjestelmän hintaan ja siten pidentävät takaisinmaksuaikaa.

Paneelien tehokkuuteen vaikuttaa myös niiden lämpötila. Paneelissa käytettävästä materiaalista riippuen tehokkuuksien on raportoitu laskevan noin $0,2 - 0,5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [51]. Erityisesti suuren säteilyintensiteetin aikana paneeleissa syntyvä lämpö voi nostaa niiden lämpötilaa huomattavasti, mikä puolestaan laskee tehokkuutta. Lämmöstä aiheutuvaa tehokkuuden laskua voidaan ehkäistä paneelien asennuksessa niin, että jätetään ilmalle mahdollisimman hyvin tilaa kiertää ja siten jäähdyttää paneeleita.

Aurinkosähköjärjestelmän mitoittamisen avuksi on niiden mahdollisen tuoton arviointiin ilmaisia työkaluja, kuten NREL:n (National Renewable Energy Laboratory) tekemä laskuri, joka hyödyntää paikkakohtaista säädataa tuoton arvioimiseen [52]. Edellä mainittu laskuri ottaa huomioon muun muassa järjestelmän aurinkopaneelien tehon, asennuskulman ja tehohäviöt sekä hyödyntää mitattuja sääolosuhteita.

3.1.2 Aurinkosähkön hetkelliseen tuottoon vaikuttavat tekijät

Aurinkopaneeleihin tulevan säteilyn määrä riippuu luonnollisesti vuorokaudenajasta. Auringon noustessa mahdollinen paneeliin osuva säteily määrä ja paneelin avulla tuotettu energia kasvaa. Tämän lisäksi auringon liikkeestä voi aiheutua myös varjostumia esimerkiksi lähistön korkeista puista tai rakennuksista. Tällaiset tekijät ovat tärkeä huomioida aurinkosähköjärjestelmän sijoittamisessa. Varjostus vähentää paneeliin tai yksittäiseen kennoon osuvan säteilyn määrää ja siten myös siitä saatavaa tehoa. Osittain varjostuneiden paneelien aurinkokennot eivät tuota tehoa yhtä paljon kuin varjostumattomat, vaan aiheuttavat ylimäärästä paikallista lämpenemistä [53]. Osittaisvarjostuksen aiheuttaman tehohäviön minimoimiseksi ja paneelien lämpenemisestä aiheutuvan vahingon välttämiseksi niiden rinnalla käytetään ohitusdiodeja. Näiden diodien käyttö kuitenkin aiheuttaa epätasaisen säteilyintensiteetin aikana järjestelmässä useampia tehon maksimipisteitä (Maximum Power Point, MPP), mikä tulee huomioida maksimitehopisteen seurannassa. Vain yksi MPP on koko järjestelmän maksimitehopiste ja loput ovat paikallisia maksimeita, jotka voivat olla teholtaan huomattavasti alhaisempia. Kuvassa 12 havainnollistettu useamman maksimitehopisteen muodostumista. [54]



Kuva 12. Teho-jännite -käyrät varjostumattomalle ja varjostuneelle paneelille sekä niiden sarjaan ja rinnan kytkennöille. Muokattu lähteestä [55].

Puiden ja rakennusten lisäksi varjostumista aiheuttaa myös pilvet. Pilvien aiheuttama varjostus on satunnaista sekä ajaltaan että voimakkuudeltaan. Tähän liittyen tutkimuksessa [55] on havaittu suurimman varjostuksen voimakkuuden olleen 95 %. Varjostuksen voimakkuus (Shading Strength, SS) voidaan kirjoittaa kaavan 1 mukaisesti muotoon [55]

$$SS = \frac{G_{us} - G_s}{G_{us}}, \quad (1)$$

jossa G_{us} on varjostumattoman tilanteen säteily määrä ja G_s pilven suurimman varjostuksen aikainen säteily määrä. Lisäksi samassa tutkimuksessa siirtymisaika pilven aiheuttamalle maksimivarjostukselle mitattiin olevan lyhimmillään 1,0 sekuntia. Vaikka nämä ääritapaukset eivät välttämättä olleet samasta varjostusta aiheuttaneesta tilanteesta, voi pilvien varjostus kuitenkin olla hyvin nopea ja voimakas. Koska pilven aiheuttama varjostus voi edetä kymmeniä metrejä sekunnissa [55], voi se peittää suuremmankin aurinkosähköjärjestelmän hyvin nopeasti.

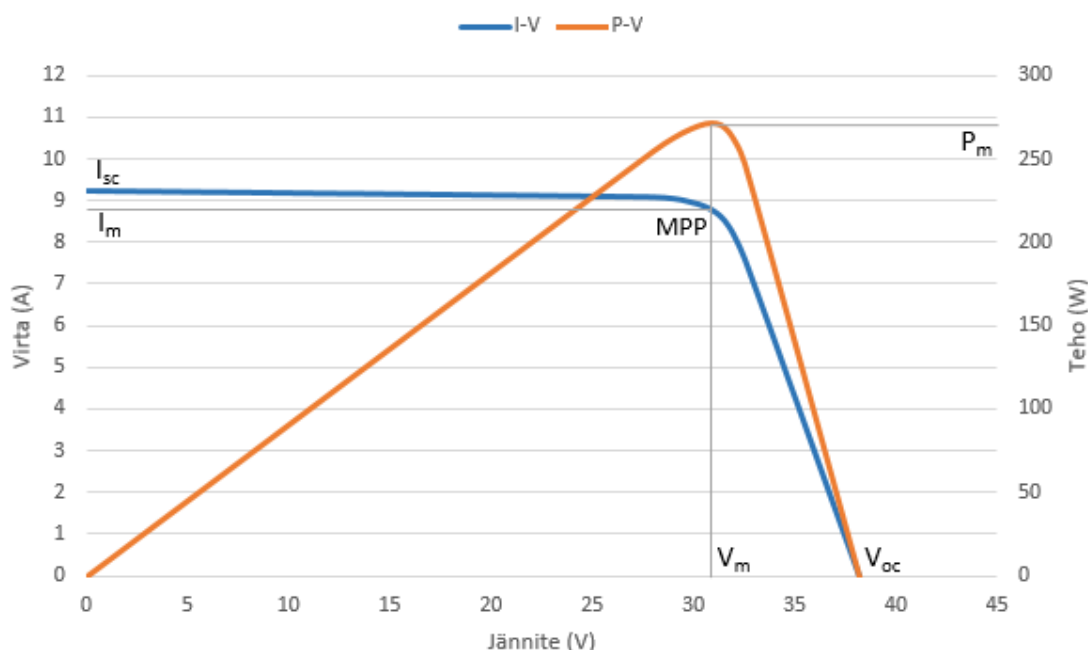
3.1.3 Tarkasteltavassa järjestelmässä käytettävät aurinkopaneelit

Tässä työssä tarkasteltavat aurinkopaneelit ovat Satmatic Oy:n nykyisissä projekteissa käytössä olevia monikiteisiä 270 W paneeleita. Ne ovat fyysisiltä mitoiltaan 1680 mm pitkiä, 990 mm leveitä ja 40 mm korkeita. Paneelien sähköisten ominaisuuksien kuvaamista varten taulukossa 5 on esitetty Flash-testin keskiarvot eräästä käytetystä aurinkopaneelien erästä.

Taulukko 5. Paneelien Flash-testin keskiarvot (Flasher $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, 26.3.2017).

V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	P_{mpp} (W)	FF (%)
38,16	9,25	30,84	8,80	271,48	76,90

Taulukosta voidaan nähdä keskiarvoiset testin avulla saadut paneelien avoimen piirin jännitteet, oikosulkuvirrat, maksimaalisen tehon arvot ja täytekertoimet. Kuvassa 13 on esitetty näiden arvojen havainnollistamiseksi aurinkopaneelin virta-jännite (I-V) -käyrä ja teho-jännite (P-V) -käyrä.



Kuva 13. Esimerkki aurinkopaneelin jännitteen, virran ja tehon suhteista.

Flash-testit suoritetaan STC (Standard Test Conditions) olosuhteissa, jossa paneelin lämpötila on 25°C , säteily on 1000 W/m^2 ja ilmamäärä on 1.5 (Air Mass, AM1.5). Tämä vastaa säteilyltään tilannetta, jossa paneelit ovat 37° vaakatasosta ja aurinko on 41.81° horisontin yläpuolella paneelia vastaan kohtisuorassa. Testin tärkeimpänä tarkoituksena on kuitenkin luoda yksinkertainen keino paneelien ominaisuuksien vertailulle samalla kun testataan paneelien haluttu toimivuus. Todellisissa olosuhteissa eri menetelmillä valmistetut paneelit toimivat kuitenkin ympäristön muuttujien suhteen eri tavalla, mikä tulee huomioida paneelien valinnassa. [40;56]

3.2 Akustot

Energiavarastot eivät ole yleisesti uusi keksintö, mutta niitä kohtaan on kasvavaa kiinnostusta muun muassa lisääntyvän aurinkosähkön ja tuulivoiman seurauksena. Aurinkosähkö ja tuulivoima tuottavat energiaa silloin, kun sitä on saatavilla, eikä silloin, kun sitä tarvitaan. Tästä johtuvan energian tuotannon ja kulutuksen eron tasaamiseen tarvitaan energian varastointia. Energian varastoinnille löytyy useita eri keinoja, joilla on erityyppisiä ominaisuuksia. Ne voidaan kuitenkin jakaa neljään päämuotoon: mekaaninen, kemiallinen, sähköinen ja lämpöön perustuva energian varastointi.

Akustot (Battery Energy Storage System, BESS) perustuvat kemialliseen energian varastointiin ja ovat viimeisten vuosikymmenten aikana kehittyneet merkittävästi. Ne omaavat työn aiheen kannalta tarvittavia ominaisuuksia ja tästä syystä energiarvarastojen tarkastelu keskittyy vain niihin. Haluttuihin ominaisuuksiin kuuluvat lataus- ja purkausteho vähintään kilowattiluokassa, nopea reagointikyky lataus- ja purkaustehon muutoksille, vähäinen itsepurkautuminen, kohtalainen energiatiheys tilavuuden suhteen, pitkä käyttöikä sekä hyvä hinnan ja energian varastointikyvyn suhde. Energiatiheyttä voidaan tarkastella myös painon suhteen yksikössä Wh/kg, mutta tämän työn käyttökohde ei aseta sille tavallisesta poikkeavaa vaatimusta.

3.2.1 Akkujen ominaisuudet

Akkujen toiminta perustuu sähköenergian muuttamiseksi kemialliseksi energiaksi latauksessa ja purkauksessa päinvastoin. Akusto koostuu kennoista, joissa on negatiivinen napa anodi, positiivinen napa katodi sekä niiden välissä elektrolyytti. Akustosta virtaa otettaessa anodin luona muodostuvat elektronit kulkevat katodille ulkoista piiriä pitkin. Elektroneutraalius toteutuu elektrolyytin läpi siirtyvien ionien ansiosta. Yksittäisen akkukennon jännite on usein pieni, esimerkiksi litiumioniakulla on noin 4 V. Näitä kennoja voi olla akuissa sekä rinnan että sarjaan kytkettyinä, jolloin saadaan halutut virta ja jännite. [57]

Käytettävän akuston valintaan vaikuttavia tekijöitä on useita. Esimerkiksi varastoitavan energian määrä, sekä teho, jännite ja virta, joilla akkua voidaan ladata tai purkaa, ovat merkittäviä tämän työn kannalta. Varastoitavan energian määrässä on myös huomioitava tarkasteltavan akun purkaussyvyys (Depth of Discharge, DoD). DoD tarkoittaa sitä osuutta, joka voidaan kokonaiskapasiteetistä hyödyntää ilman akuston nopeutuvaa vanhenemista. Näiden lisäksi investointikustannukset ja käyttöikä ovat ratkaisevassa asemassa, kun pohditaan akuston taloudellista kannattavuutta. Akuston sijoituksessa tulee myös huomioida ympäristön lämpötila. Akustojen valmistajat yleensä ilmoittavat suositellun sijoituspaikan ympäristön lämpötilavälin, jonka ulkopuolella akuston toiminta tai käyttöikä poikkeaa huomattavasti ilmoitetusta.

Akuston käyttöikä voidaan ilmoittaa lataus- ja purkausjaksojen määrällä tai ajalla, jonka jälkeen akuston elinkaari katsotaan päättyneen. Litiumioniakkujen elinkaari katsotaan usein päättyneen, kun akuston kapasiteetti on alle 80% alkuperäisestä. Vaikka elinkaaren päättyminen toisinaan määritelläänkin vapaammin, ei sitä voi jättää huomioimatta. Varsinkin litiumioniakuista tulee turvallisuusriski, kun niiden kapasiteetti on vähentynyt merkittävästi [58]. [59]

3.2.2 Akuston yleinen toimintaperiaate käyttökohteessa

Akuston tarkoitus tämän työn käyttösovelluskohteissa on maksimoida aurinkosähköllä tuotetun energian omakäyttö. Kun auringosta saatava teho on kulutusta suurempi, ohjataan aurinkopaneelien tuottamaa energiaa akustolle. Mikäli akusto on täynnä ja aurinkosähkön tuoton teho ylittää tehotarpeen, ylimääräinen energia siirtyy verkkoon. Jos taas tehotarve ylittää auringosta saatavan tehon, otetaan ensisijaisesti akustosta energiaa. Mikäli akusto ei pysty täyttämään tehotarvetta, otetaan loput tarvittavasta teho verkosta. Liitteessä 1 on yksinkertaistettu vuokaavio akuston varautumisesta ja purkautumisesta.

Tarkasteltavasta akustosta löytyy oma ohjausjärjestelmä, joka ohjaa akustoa joko purkamaan tai varautumaan tehonmittausyksikön välittämän tiedon avulla. Tehonmittausyksikkö on sijoitettava niin, että se mittaa koko järjestelmän verkosta ottamaa tehoa. Tämä tieto välitetään esimerkiksi CAN-Bus yhteydellä akustolle. Saadun tehotiedon perusteella akusto osaa päättää, tarvitseeko akustoa purkaa vai ladata.

3.2.3 Tarkasteltavan akuston sopivuus järjestelmään

Työssä tarkasteltavaksi akustoksi on valittu SolarWatt MyRserve 800 + MyReserve Extension, jonka kapasiteetti on yhteensä 8,8 kWh. Kyseinen akusto kytketään sarjaan aurinkopaneelien ja niitä varten tarvittavan vaihtosuuntaajan väliin, minkä vuoksi akusto voidaan liittää aurinkosähköjärjestelmään ilman erityistä lisätyötä myös jälkeenpäin. Tähän liittyen tulee kuitenkin huomioida akuston asettamien virta- ja jänniterajojen soveltuvuus käytettävän vaihtosuuntaajan kanssa. Virtarajan ollessa 12 A ja jänniterajan ollessa 800 V rajoittuu akuston käyttö alle 9,6 kW aurinkosähköjärjestelmille. Akuston muita ominaisuuksia on esitetty liitteessä 2.

Työn ohella selvitettiin markkinoilla tarjolla olevien 10 – 100 kWh akustojen hintatasoa. Niiden investointikustannukset tulisivat kuitenkin olemaan selvästi suuremmat kuin niistä saatava taloudellinen hyöty, kuten luvun 6 laskelmat osoittavat. Tästä johtuen tällaisten kapasiteetiltaan suurempien akustojen tarve tulee olemaan vähäisempi ja saattanee tarvita tapauskohtaisen määrittelyn joka tapauksessa. Näiden seurauksena suuremmat akustojärjestelmät jätetään tässä työssä tarkemman käsittelyn ulkopuolelle.

3.3 Vaihtosuuntaajat

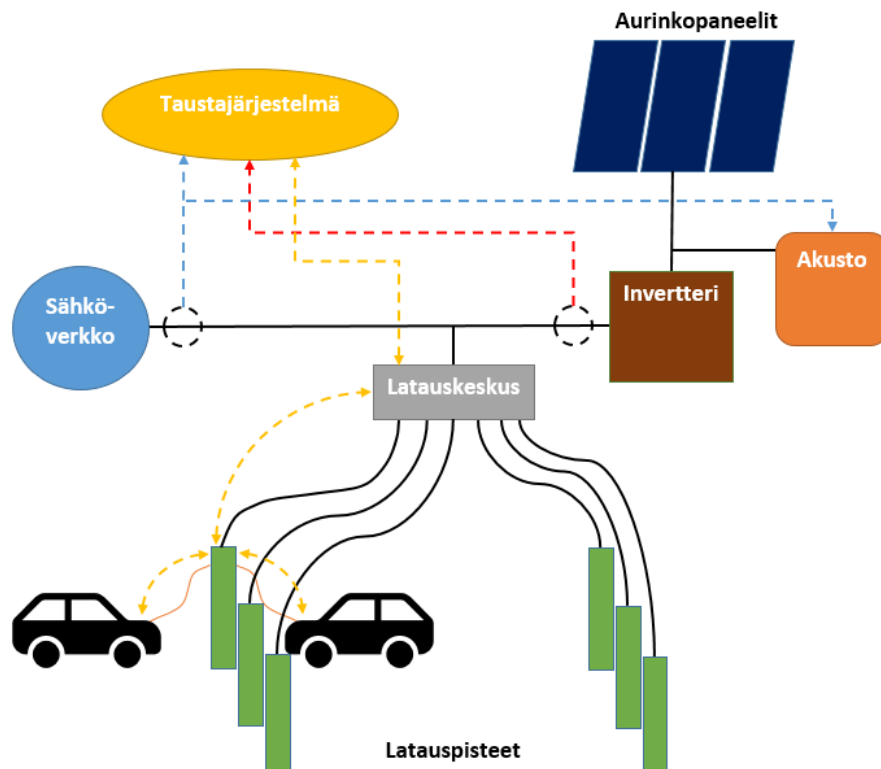
Vaihtosuuntaajan eli invertterin tehtävä on muuttaa tasavirta vaihtovirraksi. Sekä akustoista että aurinkopaneeleista saatava teho tulee tasajännitteisenä, joka voidaan vaihtosuuntaajasta riippuen muuntaa joko 1- tai 3-vaiheiseksi vaihtojännitteeksi. Tässä työssä tarkasteltavaan järjestelmäkokonaisuuteen kuuluvan invertterin on tarkoitus olla kolmivaiheinen, koska suurin osa kuormituksestakin oletetaan olevan kolmivaiheinen. Sähköverkon yhteydessä invertterin tehtäviin kuuluu myös tuotetun vaihtovirran tahdistaminen sähköverkon taajuuteen, mikä on tässä työssä tarkasteltavan järjestelmän kannalta myös olennaista.

Aurinkosähköä muunnettaessa invertteriltä vaaditaan maksimitehopisteen seuranta (Maximum Power Point Tracker, MPPT). Olosuhteiden muuttuessa aurinkopaneelin optimaalisen tehon tuottamat virta ja jännite myös muuttuvat. Maksimitehopisteen seurannan avulla aurinkopaneeleista saadaan sen hetkisissä olosuhteissa paras mahdollinen teho. Yleisin käytetty MPPT perustuu jännitteen muuttamiseen ja sen vaikutuksen tarkkailuun (Perturb and Observe, P&O) [60]. Jännitteeseen tehdään tasajännitesuuntaajan avulla askelmainen muutos vakio aika-askeleen välein. Mikäli muutoksen jälkeen teho kasvaa, on siirrytty kohti maksimitehopistettä ja seuraavan askeleen tulisi olla samaan suuntaan. Vastaavasti tehon pienentyessä jännitteeseen tehty muutos tulee seuraavaksi tehdä vastakkaiseen suuntaan. Teholtaan isommissa inverttereissä voi olla useampi erillinen piiri maksimitehopisteen seurannalle. Tällöin näistä eri paneeliketjuista saatava teho optimoidaan erikseen, ja esimerkiksi toisen varjostuminen ei tällöin vaikuta toisen tuotantoon.

Paikallista tuotantoa ja energiavarastoa hyödyntävässä järjestelmässä tulee myös huomioida saarekekäytön mahdollisuus esimerkiksi sähköverkon vian aikana. Sopivan suuruisella paikallisella tuotannolla, energiavarastolla, kuormituksella ja näiden ohjauslaitteilla on järjestelmän mahdollista muodostaa oma mikroverkko ja siten mahdollistaa saarekekäyttö. Mikäli järjestelmää ei suunnitella saarekekäyttöön, tulee järjestelmässä olla ratkaisu saarekekäytön tunnistamiselle ja syötön katkaisulle. Tahattoman saarekekäytön estäminen on tärkeää, koska syntyvän mikroverkon taajuus ja jännite eivät välttämättä pysy siihen kytkettyjen laitteiden vaatimissa rajoissa. Lisäksi saarekekäyttö saattaa tuoda vaaratilanteen esimerkiksi sähköverkon vikaa korjaavalle henkilöstölle, jos virheellisesti luullaan verkon olevan jännitteetön. Koska tässä työssä tarkasteltavassa järjestelmässä on oletuksena hyvin suuri kuorma verrattuna energiavaraston ja paikallisen tuotannon kokoon, saarekekäytön mahdollisuus ei tuo merkittävää hyötyä. Tästä johtuen tarkasteltavan järjestelmän akustolle ja aurinkosähköjärjestelmälle tarvitaan saarekekäytön esto. Käytännössä kaikissa aurinkosähköjärjestelmiin tarkoitetuissa inverttereissä on kuitenkin saarekekäytön esto jo valmiina.

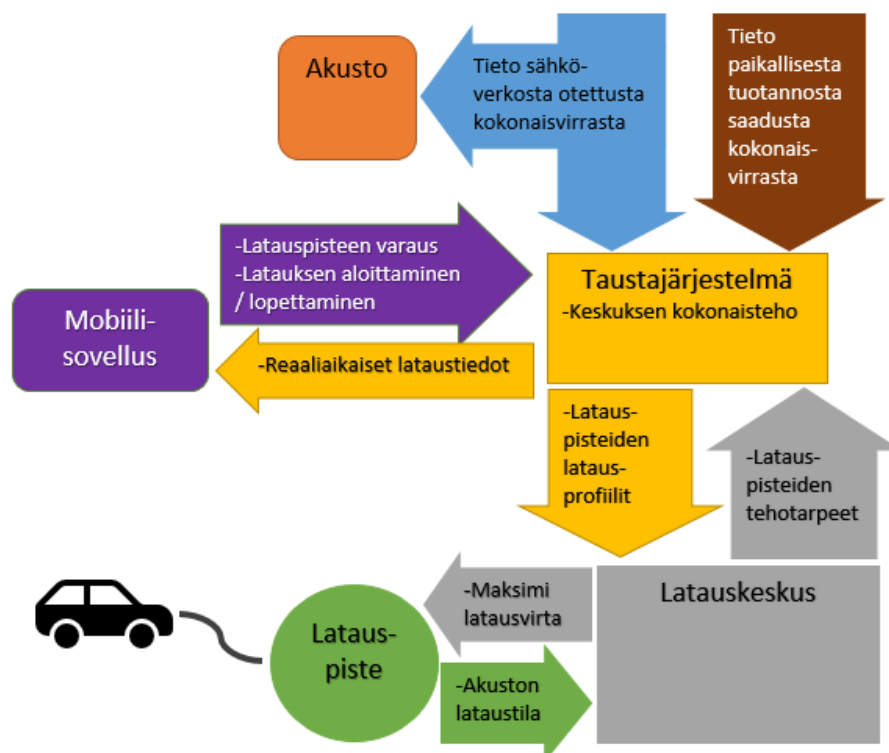
4 Latausjärjestelmän rakenne

Järjestelmäkokonaisuus on taustajärjestelmää hyödyntävä sähköajoneuvojen latauskeskus, jonka sähköverkosta saamaa sähkönsyöttöä tuetaan aurinkovoimalla ja energiavarastolla. Kuvassa 14 on havainnollistettu järjestelmäkokonaisuuteen kuuluvat osat ja niiden väliset yhteydet. Kuvassa näkyvät yhtenäiset viivat kuvaavat tehonsiirtoa ja katkoviivat tiedonsiirtoa. Katkoviivaiset ympyrät esittävät virtamittareita.



Kuva 14. Aurinkosähköä ja akustoa hyödyntävä sähköajoneuvojen latausjärjestelmä.

Järjestelmä sisältää luvun 2.7 mukaisesti latauskeskuksen, jossa on vähintään osa sähköajoneuvojen lataukseen vaadittavista laitteista. Latauskeskuksen ja latauspisteiden välillä kulkee tehon- ja tiedonsiirtoon vaadittavat kaapelit. Vaadittavan tilan vähentämiseksi yhteen lataustolppaan voidaan sijoittaa kaksi latauspistettä. Tällöin lataustolppa tulisi sijoittaa kahden parkkipaikan väliin, jotta molempien latauspisteiden käytettävyys saadaan säilytettyä. Latauskeskukseen tuleva syöttökaapeli on yhdistetty sähköverkkoliittymään sekä aurinkosähköjärjestelmästä ja akustosta saatavaan vaihtosuunnattuun tuloon. Kuormanhallintaa varten tulee jokaisen latauspisteiden ottama teho ja paikallisesta tuotosta saatava teho mitata ja välittää taustajärjestelmälle. Verkosta otetun tehon perusteella ohjataan akustoa purkautumaan tai latautumaan sekä varmistetaan sallitussa kokonaistehossa pysyminen. Järjestelmän tietoyhteyksiä on esitetty tarkemmin kuvassa 15.



Kuva 15. Järjestelmäkokonaisuuden tietoyhteydet.

Taustajärjestelmä on kokonaisuuden kannalta erittäin keskeinen, kuten kuvasta 15 voidaan havaita. Mitattujen tehotietojen avulla kuormanhallinta laskee latauspisteille tehorajat ja päivittää ne tarvittaessa latauspisteitä ohjaaville lataustehonsäätimille. Tarkasteltavan järjestelmän oletetaan hyödyntävän paikallista tuotantoa suuremman kokonaislataustehon saavuttamiseksi, kuten kappaleessa 2.6.1 mainittiin. Paikallisella tuotannolla voidaan vaihtoehtoisesti vain vähentää verkosta otettavan energian määrää, jolloin paikallisen tuotannon mittausta ja tämän mittaustiedon tiedonsiirtoa ei tarvita. Lataustapahtuman käyttöoikeuden saamista varten tarvittava tunnistautuminen tapahtuu taustajärjestelmään yhteydessä olevalla mobiilisovelluksella, jolloin saadaan kappaleessa 2.5.1 mainitut edut.

Taustajärjestelmän käytön avulla voidaan periaatteessa hyödyntää rajoittamaton määrä latauspisteitä niin, että kokonaislatausteho ei kuitenkaan tule ylittämään määritettyä rajaa. Tarpeeksi suurilla tai pienillä latauspisteiden määrillä on kuitenkin huomioitavia vaikutuksia. Mikäli latauspisteiden yhteenlaskettu maksimiteho ei ylitä järjestelmän sallittua kokonaistehoa, ei kuormituksenhallintaa tarvita. Toisaalta, mikäli sallittu kokonaislatausteho on pienempi kuin latauspisteiden määrän ja minimilataustehon tulo, tulisi kuormanhallinnalle tarve lataustapahtumien latauksen katkaisemiselle, kuten kappaleessa 2.6.3 mainittiin. Selkeyden vuoksi tarkasteltavassa järjestelmässä oletetaan latauspisteiden määrä olevan näiden rajojen välissä.

4.1 Vaatimusmäärittely

Latausjärjestelmän kriittisimpänä vaatimuksena on mahdollistaa useiden sähköajoneuvojen lataus tarvittaessa suurellakin kokonaisvirralla niin, että verkosta otettava kokonaisvirta ei kuitenkaan ylitä sallittua maksimiarvoa. Tämä sallittu maksimivirta tulee käyttökohteen sähköverkkoliittymän tai pääsulakkeen koon mukaan. Koska järjestelmässä on paikallista sähköntuotantoa, voi sähköajoneuvojen hetkellinen kokonaislatausvirta olla suurempi kuin verkosta otettavan maksimivirta. Täsmällisemmin hetkellisen kokonaislatausvirran sallittu maksimiarvo on verkosta otettavan maksimivirran ja hetkellisen paikallisesta tuotannosta saatavan virran summa, mikäli latauskeskuksen syöttökaapelien virrankesto ja johdonsuojakatkaisija ovat mitoitettu näitä suuremmaksi.

Paikallisen tuotannon hyödyntämistä maksimitehon kasvattamista varten tulee saatua tuotantoa varten olla tehomittaus, josta välitetään tieto kuormanhallintaan pienin aikavälein, sillä aurinkosähkön tuotanto voi vähentyä muun muassa pilvien takia nopeasti. Koska normaalissa tilanteessa sähköajoneuvoille ei tulisi asettaa uutta virtarajaa alle viiden sekunnin välein, on aurinkosähkön tuotannon muutoksessa otettava huomioon pieni varmuusmarginaali. Tällöin latauspisteille asetetaan uudet virtarajat vasta sitten, kun paikallinen tuotanto on muuttunut tämän marginaalin verran edellisestä muutosta vaatineesta tilanteesta. Koska esimerkiksi standardin SFS-EN 60269-1 mukaisten gG-sulakkeiden tulee kestää nimellisvirtaan nähden 1,25 kertainen virta tunnin ajan, ei reagointinopeus järjestelmän virtarajaan vaadi tarkempia tarkasteluja, kun paikallisen tuotannon vaikutus virtarajaan on suhteellisen pieni.

Kappaleessa 2.2 mainitun latausjärjestelmän investointituen ollessa merkittävän suuruinen sekä sen tosiasian, että latautuen ehdot eivät ole erityisen kohtuuttomia, on tässä työssä tarkasteltavan latauskeskusjärjestelmän omalta osaltaan täytettävä lataustuen asettamat vaatimukset. Lataustuen vaatimuksiin kuuluu latauspisteen asettaminen julkiseen käyttöön, valmius lataustehon säätöön, reaaliaikaiset saatavuustiedot, kertamaksumahdollisuus, eurooppalaisen pistokestandardin mukaisuus ja yli 11 kW latausteho. Latauspisteen asettaminen julkiseen käyttöön ei yksinään tuo järjestelmälle lisävaatimuksia tässä työssä tehdyn tarkastelun kannalta. Valmius lataustehon säätöön, reaaliaikaiset saatavuustiedot ja kertamaksumahdollisuus sisältyvät taustajärjestelmältä vaadittaviin toimintoihin. Eurooppalainen pistokestandardi tarkoittaa IEC 61851 ja 62196 mukaista lataustavan 3 ja tyyppin 2 latauspistoketta tai -pistorasiaa, joita jokaisessa latauspisteessä on tarkoitus käyttää.

Kappaleissa 2.3.2 ja 2.4 mainitun mukaisesti sähköajoneuvon lataaminen lataustavalla 3 ja tyyppin 2 pistokkeella vaatii ohjaussignaaleita CP ja PP varten tietoväylän ajoneuvon ja lataussäätimen välille. Näiden lisäksi tehonsäätimen ja pistorasian välissä tarvitaan 12 voltin jännitteellä toimiva tasavirtajohdin ohjaamaan pistokkeen lukitusta. Lataussäädin

on tietoväylän kautta yhteydessä pilvipohjaiseen taustajärjestelmään OCPP 1.6 kommunikointiprotokollan mukaisesti. Itse tehonsiirtoa, joka yleisen kustannus-tehokkuuden kannalta rajoitetaan 22 kW:iin, varten tarvitaan latauskeskuksen ja latauspisteen välille 32 A ja 400 V jatkuvaan käyttöön soveltuva kaapeli. Jokaiselle latauspisteen syöttökaapelille tarvitaan 32 A johdonsuojakatkaisija sekä B-tyypin 30 mA vikavirtasuojia IEC 60364 standardin vaatimusten mukaisesti.

SolarWatt MyReserve akustoa hyödynnettäessä aurinkosähköjärjestelmä tulee mitoittaa akuston virta ja jännitealueen mukaan. Kappaleen 3.2.3 mukaisesti MyReserve 8.8 kWh akuston toiminta-alue soveltuu yksinkertaisella kytkennällä osaksi maksimissaan 9,6 kW aurinkosähköjärjestelmää. Myös invertterin tulee toimia käytettävän akuston toiminta-alueella. Tieto sähköverkosta otetusta tehosta tulee mitata ja välittää akustolle, jonka avulla se voi päätellä purkauksen tai latauksen tarpeen. Mikäli käyttökohteeseen on tarve suuremmalle aurinkosähköjärjestelmälle, tulee kyseisen akuston tilalle määritellä tapauskohtainen ratkaisu. Tämän työn ohella kartoitettiin akustovaihtoehtoja tilanteisiin, joissa vaaditaan suurempaa energianvarastointikykyä tai lataus- ja purkaustehoa, mutta nämä jätettiin mahdolliseksi jatkokehityskohteeksi niiden korkean hintatason vuoksi. Vaihtoehtoisesti suurempi aurinkosähköjärjestelmä voidaan toteuttaa myös jättämällä akusto kokonaan pois.

Aikaisemmin esitetyn kuvan 15 mukaisesti taustajärjestelmä on keskeisin osa järjestelmäkokonaisuuden tietoyhteyksiä. Taustajärjestelmän tehtäviin kuuluu kappaleissa 2.5 ja 2.6 mainitut käyttäjään liittyvien toimintojen toteuttaminen sekä sähköajoneuvojen latauskuormanhallinta. Taustajärjestelmän on tuettava mobiili-sovellusta, jolla käyttäjä voi nähdä latauspisteen sijainnin ja käytettävyyden. Mobiilisovelluksella on voitava lisäksi tehdä varaus latauspisteelle sekä aloittaa ja lopettaa lataustapahtuma. Kuormanohjausta varten taustajärjestelmän tulee olla tietoväylällä yhteydessä lataussäätimiin OCPP 1.6 protokollan mukaisesti. Lisäksi paikallisen tuotannon hyödyntämiseksi taustajärjestelmän tulee voida vastaanottaa sen tehotietoa ja hyödyntää sitä kuormanhallinnassa.

4.2 Latauskeskuksen toteutusvaihtoehdot

Kappaleen 2.7 mukaisesti tarkasteltavassa järjestelmässä on tarkoitus hyödyntää latauskeskusta, jossa on vähintään osa latauspistettä varten tarvittavista latauslaitteista. Tämän työn tekohetkellä oli tiedossa kahden eri valmistajan tuovan markkinoille modulaarisen ratkaisun sähköajoneuvojen lataukselle, jolla mahdollistetaan kompakti latauskeskuksen toteuttaminen. Toinen näistä perustuu automaatiototeutukseen, jossa lähtö- ja tulopiirit ovat viety prosessiaseman luota lähemmäs toimilaitetta. Tällaisesta ratkaisusta käytetään nimitystä hajautettu I/O ja se otettiin syvempään tarkasteluun, sillä Satmatic Oy:llä on vahva kokemus kyseiseltä aihepiiriltä.

Vaihtoehtoinen ratkaisu on muodostaa latausjärjestelmä lataustolpista, jotka sisältävät lähes kaikki lataukselta vaadittavat toiminnot. Tällöin latauskeskuksessa voi olla vain latausjärjestelmän pääsyöttö, jokaisen latauspisteen syöttö ja tarvittavat suojaukset. Kaikki kappaleessa 4.1 mainitut toiminnot tulee kuitenkin toteutusvaihtoehdosta riippumatta sisältyä järjestelmäkokonaisuuteen, jotta voidaan taata sen luotettava ja standardien mukainen toiminta. Mikäli tunnistautumista ei tarvita, voidaan molemmissa tapauksissa toteuttaa paikallinen kuormanhallinta. Tehonsäätimet, jotka tukevat ”master/slave” ohjausmuotoa, pystyvät tyypillisesti toteuttamaan kuormanhallinnan vain muutaman latauspisteen muodostamalle järjestelmälle. Automaatiokomponenteilla toteutettava kuormanhallinta voi ohjata latausryhmän kaikkia latauspisteitä, vaikka niitä olisi toistakymmentä, eikä sen toteuttaminen vaadi mitään lisäkomponentteja.

Latauskeskusratkaisun avulla voidaan mahdollistaa suoraviivaisempi toteutus usean, esimerkiksi 40, latauspisteen sisältämälle latausjärjestelmälle. Latauskeskusmallia hyödyntämällä voidaan esimerkiksi tämä 40 latauspisteen latausjärjestelmä jakaa neljäksi latauskeskukseksi, joissa jokaisessa on 10 latauspistettä. Tällöin suunnitteleminen vaatii käytännössä vain 10 latauspisteen sisältävän latauskeskuksen suunnittelun. Näitä latauskeskuksia voidaan sitten sisällyttää haluttuun järjestelmään tarvittava määrä. Mikäli latausjärjestelmä suunniteltaisiin aina yksittäisistä latauspisteistä, kuluisi suunnitteluun mahdollisesti huomattava määrä resursseja silloin, kun kysyntää on paljon. Latauskeskusmallin avulla voidaan säästää suunnittelussa tarvittavaa aikaa ja helpottaa asiakkaalle annettavan tarjouksen tekoa, koska yhtä latauskeskukselle tehtyä suunnitelmaa voidaan oletettavasti hyödyntää usein hyvin vähäisillä muutoksilla tai jopa suoraan eri projekteissa. Tämän työn ohella toteutettiin yrityksen sisäiseen käyttöön tarkoitettu osalista, joka sisältää tarvittavat komponentit ja alustavan suunnitelman latauskeskuksen toteuttamiseksi edellä mainituilla automaatiokomponenteilla.

5 Järjestelmäkokonaisuuden laskentamalli

5.1 Kuormituksen arviointi

Järjestelmän mitoitusta on hyvä lähestyä kuormituksen arvioimisen kautta. Kuten kappaleessa 2.1 mainittiin, niin ladattavien hybridiajoneuvojen määrä on tällä hetkellä moninkertainen täyssähköautojen määrään verrattuna. Ladattavien hybridiajoneuvojen määrä on myös nopeammassa kasvussa, joten niiden on myös odotettavissa edustavan selvää enemmistöä ainakin seuraavien lähivuosien aikana. Taulukossa 6 on esitetty Suomen suosituimpien ladattavien ajoneuvojen määrä, arvioitu sähköinen toimintasäde ja ajoakuston kapasiteetti. Taulukossa esitetyt luvut eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia, sillä esimerkiksi niiden taustalla olleista olosuhteista ei ole tarpeeksi tietoa. Erityisesti Suomessa kylmällä säällä sähköisen toimintasäteen on odotettavissa olevan selvästi lyhempi muun muassa auton sisätilan lämmityksestä johtuvan energian kulutuksen lisääntymisestä.

Taulukko 6. Suomen kuusi yleisintä ladattavaa hybridi- tai täyssähköajoneuvoa 31.12.2017 [61–67].

Malli	Määrä Suomessa [kpl]	Sähköinen toimintasäde arvio [km]	Ajoakun kapasiteetti [kWh]
MITSUBISHI OUTLANDER PHEV	600	35	12
MERCEDES-BENZ GLC 350 E	529	34	5
TESLA MOTORS MODEL S	523	400–500	70–100
VOLVO XC90 PLUG-IN HYBRID	458	40	6,5
VOLKSWAGEN PASSAT GTE	436	27	9,9
OPEL AMPERA	407	60	16

Taulukosta 6 voidaan laskea arvio yhdellä kilowattitunnilla kuljettavalle matkalle. Luvut saattavat siis olla hieman optimistisia Suomen olosuhteisiin nähden, joten pyöristäminen alaspäin on perusteltua, ja siten saamme matkan ja tarvittavan energian suhteeksi 4 km/kWh eli 0,25 kWh/km. Liikenneviraston tekemän tutkimuksen mukaan kotimaassa liikutaan vuorokauden aikana keskimäärin 41 kilometriä [68]. Toisaalta suomalaisen keskimääräisen työmatkan on raportoitu olevan 14 km [69]. Koska kotilatauksen on odotettavissa pysyvän suosituimpana latausmuotona, voidaan ladattavan ajoneuvon akuston olettaa olevan täynnä ennen kyseistä päivittäistä matkaa. Tällöin saadaan keskimääräiseksi työpaikalla tapahtuvalle lataukselle 3,5 kWh ladattavaa ajoneuvoa kohden. Jos sen sijaan tarkastellaan työpäivän jälkeen tehtävää latausta esimerkiksi puolessa välissä jäljelle jäävää vuorokausittaista matkaa, saadaan ladattavan energian

määräksi 3,375 kWh tai 6,875 kWh ajoneuvoa kohden riippuen siitä, ladataanko ajoneuvo työpaikalla vai ei.

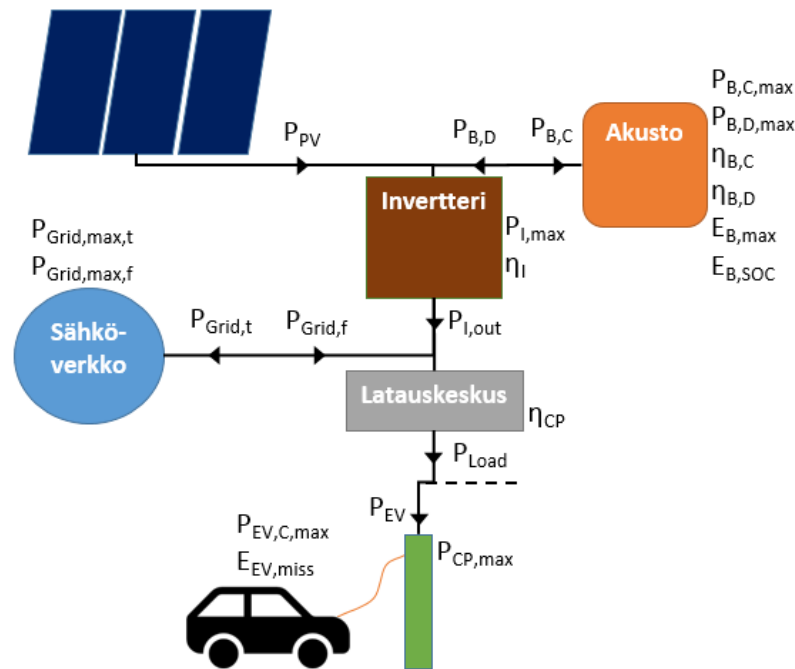
Sähköajoneuvoissa olevien lataukseen liittyvien häviöiden vuoksi voidaan ajoneuvon tarvitseman energian ajatella olevan suurempi latauslaitteen näkökulmasta. Tutkimuksessa [70] on saatu ladattavassa ajoneuvossa olevien tehoelektroniikka-häviöiden olevan 0,88 % - 16,53 %, mikä riippuu lataukseen käytettävästä virrasta ja akuston varaustasosta. Mikäli kaikkien häviöiden oletetaan olevan yhteensä 10 %, saadaan latauspisteeltä tarvittavaksi energiaksi keskimäärin noin 3,9 kWh työpaikalla ja 7,64 kWh lataustapahtumalle, joka on puolessa välissä työpäivän jälkeistä vuorokausittaista matkaa ja jota ennen ei ole ajoneuvoa ladattu sinä päivänä.

Työpaikalla tapahtuvan latauksen ajaksi voidaan olettaa 8 tuntia, jolloin keskimääräiseksi tehoksi riittää 0,49 kW ladattavaa ajoneuvoa kohden, jotta ajoneuvon akusto saadaan ladattua täyteen. Työpaikoille riittänee siis oletettavasti monessa tapauksessa hidas lataus. Hitaankin latauksen tapauksessa tulee huomioda ladattavien ajoneuvojen vaatima minimilatausvirta 6 A ja sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä käytettävä tasoituskerroin 1, kuten kappaleessa 2.6 mainittiin. Jos kuitenkin halutaan latausjärjestelmän mahdollistavan suuremmat lataustehot, jotta esimerkiksi pidemmän työmatkan kulkevien ajoneuvojen akusto saadaan ladattua täyteen, tulee kuormanhallinta tarpeelliseksi. Jos tarkastellaan edellä mainitun mukaisesti kauppamatkan yhteydessä tehtävää latausta, saadaan keskimääräiseksi lataustehoksi 15,28 kW, kun ei huomioda työpaikkalatausta ja oletetaan kauppamatkan kestoksi 30 min. Koska osa latauspisteitä hyödyntävistä ajoneuvoista tulee melko varmasti kuitenkin olemaan täyssähköajoneuvoja, joilla voi olla tarvetta suuremmallekin energiatarpeelle, on latausjärjestelmään perusteltua suunnitella 22 kW tehoiset latauspisteet.

Laskennassa käytettävän kuormituksen ajoituksen mallintamiseksi on työpaikan työajaksi valittu 8 tuntia, joka alkaa liukuvasti kello 7.00 - 8.15. Kauppakeskuksen yhteydessä tapahtuva lataus on valittu ajoittumaan kello 7.00 ja 21.00 välille niin, että suurin latauspisteiden käyttöaste on iltapäivällä. Latauspisteiden varausajat ovat valittu niin, että keskimääräiseksi latauspisteen varausajaksi muodostui 47 minuuttia, jonka on oletettu vastaavan keskisuudessa kauppakeskuksessa vietettävää keskimääräistä aikaa. Liitteissä 3 ja 4 on esitetty laskennassa käytetyt lataustapahtumien ajoitukset järjestyksessä työpaikalle ja kauppakeskukselle. Satunnaisuuden lisäämiseksi ajoneuvoille on molemmissa tapauksissa valittu puuttuvalle energialle satunnainen kerroin väliltä 0,5 – 2 niin, että niiden keskiarvo on kuitenkin 1, jotta haluttu keskiarvo säilyy. Täyssähköajoneuvoille mahdolliset suuret energiavajaukset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

5.2 Energian tuoton ja kulutuksen mallinnus järjestelmässä

Aurinkosähköä ja akustoa hyödyntävän järjestelmän energian siirtymistä kuvaavassa mallissa muuttujien määrä nousee kohtalaisen nopeasti jo muutamilla laskennan tarkkuutta parantavilla tekijöillä. Tämän selventämiseksi kuvassa 16 on esitetty laskennassa käytettyjä muuttujia. Tehon siirtymistä on kuvattu P :llä, varastoitua energiaa E :llä ja hyötysuhdetta η :lla.



Kuva 16. Laskennassa käytetyt muuttujat.

Koska latausjärjestelmä sisältää useita tekijöitä, jotka vaikuttavat hetkellisen latauskuorman suuruuteen, selvitetään aluksi potentiaalinen latauskuorma, joka toteutuisi, jos verkosta otettavalle teholle ei ole ylärajaa. Tämä latausaseman potentiaalinen kokonaiskuorma voidaan laskea latausjärjestelmän yksittäisten latauspisteiden lataustapahtumien summana. Mikäli ladattavaan ajoneuvoon mahtuvaa energiaa merkitään muuttujalla $E_{EV,miss}$, latauspisteen maksimitehoa $P_{CP,max}$ ja ladattavan ajoneuvon maksimilataustehoa $P_{EV,C,max}$, saadaan ajoneuvon potentiaalinen latausteho $P_{EV,C,p}$ kaavan 2 mukaisesti

$$P_{EV,C,p} = \min \left(P_{EV,C,max}, P_{CP,max}, \frac{E_{EV,miss}}{t} \right), \quad (2)$$

jossa t on tarkasteltavan aikajakson pituus. Tällöin latausaseman potentiaalinen kokonaiskuorma $P_{Load,p}$ saadaan latauksessa olevien ajoneuvojen potentiaalisten lataustehojen summana kaavan 3 mukaisesti

$$P_{Load,p} = \sum_{n=1}^l (P_{EV,C,p}), \quad (3)$$

jossa l on latauksessa olevien ajoneuvojen määrä.

Toteutuva latauskuorma riippuu potentiaalisen latauskuorman lisäksi saatavilla olevasta tehosta. Järjestelmä hyödyntää ensisijaisesti aurinkosähköä latauskuorman kattamiseen. Tämän jälkeen puuttuva teho pyritään saamaan akustosta ja viimeisimpänä vaihtoehtona verkosta. Laskennassa tarkasteltavassa järjestelmässä akusto on aurinkosähkön kanssa samassa dc-piirissä, jolloin invertteriltä saatava teho riippuu siis myös akustosta saatavasta tai akustoon siirrettävästä tehosta. Akustosta saatavaa potentiaalista maksimitehoa $P_{B,D,max,p}$ on kuvattu kaavassa 4

$$P_{B,D,max,p} = \min(P_{B,D,max}, \frac{E_{B,SOC}}{t} * \eta_{B,D},) \quad (4)$$

jossa $P_{B,D,max}$ on akuston maksimipurkausteho, $E_{B,SOC}$ akuston käytettävissä oleva varaus ja $\eta_{B,D}$ on akuston hyötysuhde purkautumisessa. Tällöin invertteriltä saatava potentiaalinen maksimiteho $P_{I,out,max,p}$ saadaan kaavan 5 mukaisesti

$$P_{I,out,max,p} = \min(P_{I,max}, P_{PV} + P_{B,D,max,p}) * \eta_I, \quad (5)$$

jossa $P_{I,max}$ on invertterin vastaanottama maksimiteho, P_{PV} on aurinkosähköstä saatava tuotto ja η_I on invertterin hyötysuhde. Akustoon ladattava potentiaalinen maksimiteho $P_{B,C,max,p}$ voidaan laskea kaavan 6 avulla

$$P_{B,C,max,p} = \min(P_{B,C,max}, \frac{E_{B,max} - E_{B,SOC}}{t * \eta_{B,C}}), \quad (6)$$

jossa $P_{B,C,max}$ on akuston maksimilatausteho, $E_{B,max}$ on akuston maksimivaraus ja $\eta_{B,C}$ on akuston varautumisen hyötysuhde. Koska ensisijaisesti kuormitus pyritään kattamaan paikallisesta tuotannosta ja ylimääräinen aurinkosähkö pyritään varastoimaan akustoon, voidaan invertteriltä saatava teho kirjoittaa kaavan 7 mukaan

$$\begin{cases} P_{I,out} = \max\left(\frac{P_{Load,p}}{\eta_{CP}}, \min(P_{PV} - P_{B,C,max,p}, P_{I,max}) * \eta_I\right), \\ \quad \text{kun } \frac{P_{Load,p}}{\eta_{CP}} \leq P_{I,out,max,p} \\ P_{I,out} = P_{I,out,max,p}, \text{ kun } \frac{P_{Load,p}}{\eta_{CP}} > P_{I,out,max,p} \end{cases}, \quad (7)$$

jossa η_{CP} on latauslaitteistoon liittyvä hyötysuhde. Akustoa ohjataan siis purkautumaan niin, että invertteriltä saadaan kaavassa 5 laskettu potentiaalinen maksimiteho, kun kuormitus on vielä tätä suurempi. Mikäli kuormitus voidaan kattaa kokonaan paikallisella tuotannolla ja akustosta saatavalla energialla, pyritään ottamaan akustosta energiaa mahdollisimman vähän tai varastoimaan siihen mahdollisimman paljon ylimääräistä energiaa. Tämä mahdollinen ylimääräinen aurinkosähkön tuotto pyritään syöttämään invertterin kautta verkkoon, mikäli sitä ei voida akustoon varastoida.

Invertteriltä saatavan tehon ja aurinkosähkön tuottaman tehon avulla voidaan päätellä toteutuva akustoon varautuva $P_{B,C}$ tai akustosta purkautuva $P_{B,D}$ teho, joka on esitetty kaavassa 8

$$\begin{cases} P_{B,C} = \min(P_{B,C,max,p}, P_{PV} - \frac{P_{I,out}}{\eta_I}) \text{ ja } P_{B,D} = 0, \text{ kun } P_{PV} \geq \frac{P_{I,out}}{\eta_I} \\ P_{B,C} = 0 \text{ ja } P_{B,D} = \min(P_{B,D,max,p}, \frac{P_{I,out}}{\eta_I} - P_{PV}), \text{ kun } P_{PV} < \frac{P_{I,out}}{\eta_I} \end{cases} \quad (8)$$

Näiden avulla voidaan kirjoittaa akuston uusi varaus $E_{B,SOC,2}$ kaavan 9 mukaisesti

$$\begin{cases} E_{B,SOC,2} = E_{B,SOC} + P_{B,C} * t * \eta_{B,C}, \text{ kun } P_{B,C} > 0 \\ E_{B,SOC,2} = E_{B,SOC} - P_{B,D} * \frac{t}{\eta_{B,C}}, \text{ kun } P_{B,C} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Koska akuston varaustila huomioitiin jo potentiaalisessa lataus- tai purkaustehossa, ei kaavassa 9 tarvitse enää erikseen tarkastella sallitun varaustilan ylittymistä tai alittumista.

Mikäli kuormaa varten tarvitaan enemmän tehoa kuin auringosta ja akustosta on sillä hetkellä saatavissa, voidaan verkosta otettava teho $P_{Grid,f}$ kirjoittaa kaavan 10 muotoon

$$P_{Grid,f} = \min(\frac{P_{Load,p}}{\eta_{CP}} - P_{I,out}, P_{Grid,max,f}), \text{ kun } \frac{P_{Load,p}}{\eta_{CP}} \geq P_{I,out}, \quad (10)$$

jossa $P_{Grid,max,f}$ on verkosta otettava maksimiteho. Latausjärjestelmän kuormanhallinta huolehtii siis latauspisteiden kuormituksesta niin, että verkosta otettava teho ei tule ylittämään $P_{Grid,max,f}$ määrittämää rajaa. Jos taas latauspisteiden kuormitus on pienempi kuin invertteriltä tuleva teho, saadaan verkkoon syötettävä teho $P_{Grid,t}$ kaavasta 11

$$P_{Grid,t} = \min(P_{I,out} - \frac{P_{Load,p}}{\eta_{CP}}, P_{Grid,max,t}), \text{ kun } \frac{P_{Load,p}}{\eta_{CP}} < P_{I,out}, \quad (11)$$

jossa $P_{Grid,max,t}$ on verkkoon syötettävän tehon maksimiarvo. Tällöin latauspisteiden toteutuva kuorma P_{Load} saadaan kaavan 12 mukaisesti

$$\begin{cases} P_{Load} = (P_{Grid,f} + P_{I,out}) * \eta_{CP}, \text{ kun } P_{Grid,f} > 0 \\ P_{Load} = (-P_{Grid,t} + P_{I,out}) * \eta_{CP}, \text{ kun } P_{Grid,f} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Aurinkosähköä hyödynnetessä on mahdollista tulla vastaan tilanne, jossa kaikkea energiaa ei voida millään tavoin hyödyntää. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi alimitoitettu invertteri tai sellaiset tilanteet, joissa kaikkea aurinkosähköjärjestelmän ylimääräistä tuottoa ei voida syöttää verkkoon. Koska tarkasteltavassa järjestelmässä akusto ohjataan varautumaan ylimääräisellä aurinkoenergialla, saadaan invertterin alimitoituksesta johtuva hukkatheho $P_{I,loss}$ kaavan 13 mukaisesti

$$P_{I,loss} = (P_{PV} - P_{I,max} - P_{B,C,max,p}) * \eta_I, \text{ kun } P_{PV} > P_{I,max} + P_{B,C,max,p}. \quad (13)$$

Jos puolestaan verkkoon ei voida syöttää kaikkea ylimääräistä aurinkosähköjärjestelmän tuottoa, voidaan hukkaan menevä teho $P_{Grid,loss}$ laskea kaavalla 14

$$P_{Grid,loss} = P_{I,out} - \frac{P_{Load}}{\eta_{CP}} - P_{Grid,max,t}, \text{ kun } P_{I,out} > \frac{P_{Load}}{\eta_{CP}} + P_{Grid,max,t}. \quad (14)$$

Verkkoon syötettävälle teholla ei kuitenkaan usein ole muuta rajoitetta kuin pääsulakkeiden asettama rajoitus, joka rajoittaa myös verkosta otettavaa tehoa. Mikäli tarkastelu kohdistuu ”off-grid” järjestelmään, joka ei ole liitettyä sähköverkkoon, voidaan mallinnuksessa asettaa verkosta otettavalle ja verkkoon syötettävälle teholla maksimiarvoiksi nolla. Tässä työssä ei kuitenkaan tarkastella ”off-grid” järjestelmän asettamia vaatimuksia syvällisemmin.

5.3 Laskentaan liittyvät lähtötiedot ja oletukset

Laskennassa käytettiin aurinkosähkön tuottona Satmatic Oy:n oman 30 kW aurinkosähköjärjestelmän mitattua tuotantoa vuodelta 2017. Laskelmaan haluttiin mukaan koko vuosi, jotta tuloksissa ei tarvitse erikseen huomioida eri vuodenaikoja. Tässä mittausdatassa on jo huomioitu DC piirin tehohäviöt. Mittausdata saatiin viiden minuutin aikajaksoilla, mutta laskennan keventämiseksi aikajakso kasvatettiin 15 minuuttiin. Mittausdata saadaan vastaamaan erikokoista aurinkosähköjärjestelmää kertomalla hetkelliset arvot halutun järjestelmän kapasiteetin ja 30 kW suhteella. Akuston oletusarvoisina lähtötietoina käytettiin kappaleessa 3.2.3 mainitulle MyReserve 800 akustolle ilmoitettuja lukuja, jotka ovat listattu liitteessä 2. Vaikka kyseinen akusto ei sovellu yli 10 kW aurinkosähköjärjestelmille, voidaan laskennassa arvioida myös siitä saatavaa hyötyä osana suurempaa aurinkosähköjärjestelmää. Yksinkertaistuksen vuoksi akuston kapasiteetin väheneminen ajan ja käyttösykliä seurauksena jätetään huomioimatta. Invertterin oletusarvoisina lähtötietoina käytettiin eräälle 3 kW invertterille ilmoitettuja lukuja. Verkosta otettavan kolmivaiheisen virran maksimiarvona käytetään oletuksena 63 ampeeria, joka johtaa 43,47 kW tehoon. Sähkön ostohintana käytetään 9 snt/kWh, joka sisältää myös siirtomaksun ja verot, ja myyntihintana 3 snt/kWh.

Kuormituksen mallintamisen yksinkertaistamiseksi laskennassa oletetaan ladattavien ajoneuvojen hyödyntävän sallittua tehoa portaattomasti ja se, ettei latauspisteiden syöttöä tarvitse latauskuorman rajoittamiseksi katkaista. Myöskään kappaleen 2.6.3 mukaista epävarmuutta sallitun kokonaislatausvirran hyödyntämisessä ei huomioida, koska siihen liittyviä tekijöitä ei tunneta riittävän tarkasti. Lisäksi kaikkien latauspisteiden maksimiteho ja ladattavien ajoneuvojen hyödyntämä maksimiteho oletetaan samoiksi. Nämä yksinkertaistavat laskennassa tarkasteltavaa järjestelmää jonkin verran, mutta lataustapahtumien aloitusaikojen, keston ja maksimi latausenergian vaihtelun seurauksena saadaan selkeästi vaihteleva kokonaiskuorma. Sähköajoneuvojen lataukseen, akustoon, aurinkosähköjärjestelmään ja invertteriin liittyvät oletusluvut on

listattu myös liitteessä 2. Latauspisteiden määräksi valittiin 8 kappaletta laskennassa tarkasteltavalle järjestelmälle, ja latauskuormana käytettiin liitteiden 3 ja 4 mukaisia kuormia. Työpaikalla tapahtuva lataus oletetaan ajoittuvan vain arkipäiville, kun taas kauppakeskuksella tapahtuva lataus oletetaan ajoittuvan jokaiselle päivälle.

6 Laskennan tulokset järjestelmäkokonaisuudelle

Aurinkosähköstä ja akustosta saatava hyöty sähköajoneuvojen latausjärjestelmän ohessa tulee luonnollisesti olemaan erilainen käyttökohteesta riippuen. Erilaisten parametrien vaikutusten tarkastelua varten tässä työssä vertaillaan koko vuoden ajalta kertyviä tietoja seuraavista muuttujista: verkosta otettava kokonaisenergia ($E_{\text{Grid},f}$), verkkoon syötettävä kokonaisenergia ($E_{\text{Grid},t}$), aurinkosähkön tuotto (E_{PV}), toteutuva latausenergia (E_{load}), ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia ($E_{\text{Load,max}}$), lataamatta jäävä energia ($E_{\text{Load,max}} - E_{\text{load}}$). Verkosta otetun ja verkkoon syötetyn kokonaisenergian avulla voidaan laskea sähkön osto- ($C_{E,\text{Grid},f}$) ja myyntiarvo ($C_{E,\text{Grid},t}$), joilla voidaan arvioida järjestelmien käyttökustannuksia keskenään. Koska sähköajoneuvojen latausjärjestelmän tarkoitus on mahdollistaa sähköajoneuvojen lataus, tulee vertailuissa huomioida myös toteutuva latausenergia ja lataamatta jäävä energia.

Paikallisen tuotannon ja muiden järjestelmän tekijöiden tarkastelemiseksi määritellään aluksi perustilanne. Selkeyden vuoksi perustilanteesta on jätetty verkosta otettavan tehon rajoitus sekä aurinkosähkön ja akuston hyödyntäminen pois, jolloin latauskuorman syötettävä energia otetaan yksinkertaisesti verkosta. Tämä on lähtötilanne molemmille tapauksille, kauppakeskuksessa toimivalle järjestelmälle ja työpaikalla toimivalle järjestelmälle, jonka jälkeen tarkastellaan erilaisten tekijöiden vaikutusta niiden toimintaan.

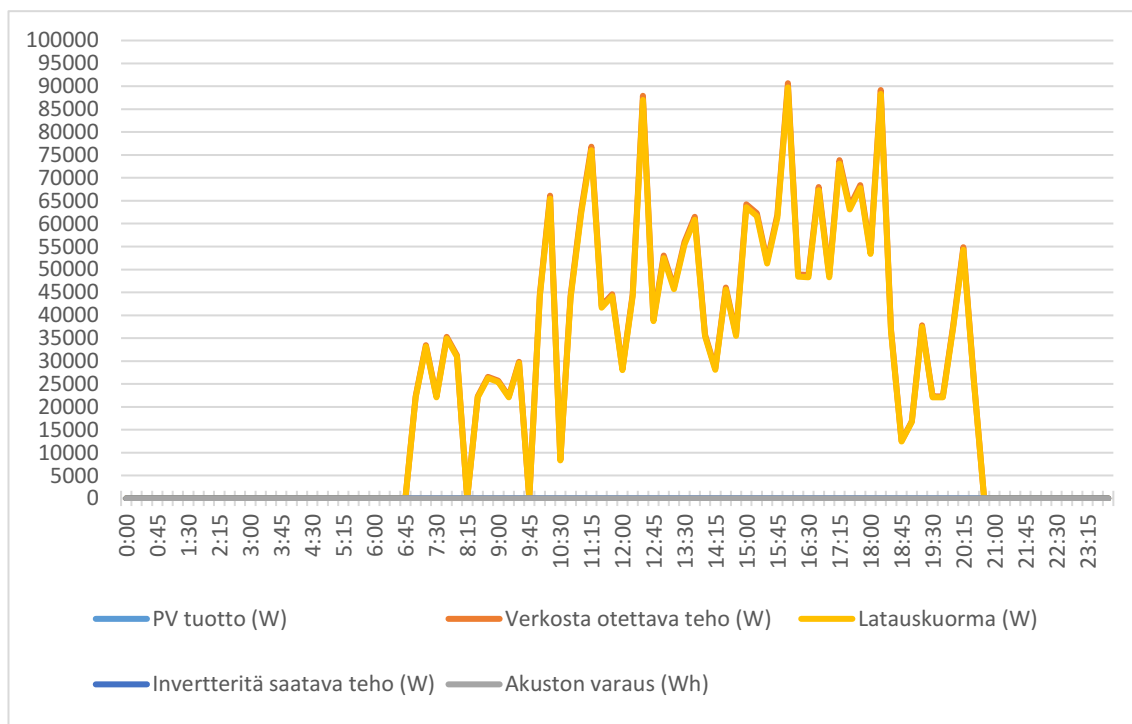
6.1 Kauppakeskuksen latausjärjestelmä

Kauppakeskuksen latausjärjestelmän vuotuiset tunnusluvut on esitetty taulukossa 7, kun paikallista tuotantoa ei huomioida ja latauspisteiden teho on 22 kW. Koska verkosta otettavan tehon rajoittaminen jätetään tässä lähtötilanteen selvityksessä pois ja ajoneuvojen maksimilataustehojen oletetaan olevan 30 kW, ajoneuvot voivat hyödyntää tarvittaessa latauspisteiden koko 22 kilowatin tehon.

Taulukko 7. Vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa ei rajoiteta verkosta otettavaa tehoa.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	217651,86	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	0	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	19588,67	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	0	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	0	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	215475,34	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	220299,40	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	4824,06	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukon 7 arvoista voidaan nähdä ajoneuvoille syötettävän energian tulevan suoraan verkosta, jolloin vain latauspisteisiin liittyvä hyötysuhde hieman vaikuttaa siihen. Näistä arvoista voidaan myös huomata, että ajoneuvoihin jää energiaa lataamatta, vaikka verkosta otettavaa tehoa ei rajoiteta. Tämä energia, joka jää edelleen lataamatta, on seurausta latauspisteen maksimitehorajasta. Kauppakeskuksen latauspisteiden kuormitusmalli, joka on esitetty liitteessä 4, sisältää muutaman lyhyen lataustapahtuman. Nämä lataustapahtumat vaatisivat latauspisteen maksimitehoa suuremman latausnopeuden, jotta ajoneuvon akusto latautuisi täyteen. Ajoneuvoihin mahtuvasta energiasta saadaan kuitenkin 97,8 % ladattua, mikä on todella hyvä. Hetkellisen tilanteen havainnollistamiseksi kuvassa 17 on havainnollistettu latauskuormaa.



Kuva 17. Kuormitus kesäpäivänä kauppakeskuksen latausjärjestelmässä, kun verkosta otettavaa tehoa ei rajoiteta.

Kuvan 17 latauskuorma sisältää muutaman korkean tehopiikin, minkä on todennäköistä tapahtuvan todellisissakin latausjärjestelmän kuormituksissa. Kuten kappaleessa 2.6 mainittiin, tulee latausjärjestelmä mitoittaa suurimman kuorman mukaan, vaikka sen odotettaisiinkin tapahtuvan hyvin harvoin. Tässä tapauksessa 8 latauspisteen suurin mahdollinen kuorma olisi 176,64 kW eli 256 ampeeria, mikä johtaisi hyvin kalliiseen verkkoliittymään. Kauppakeskuksen latausjärjestelmän latauspisteiden käyttöä kuvaavassa mallissa on koko ajan vähintään yksi ajoneuvo latautumassa, mutta koska täyteen ladattu ajoneuvo ei enää vaadi tehoa, laskee aamupäivällä kuormitus kahdesti nolnaan.

6.1.1 Kuormanhallinnan vaikutus latausjärjestelmässä

Kuten luvussa 2.6 mainittiin, kuormanhallinnalla voidaan rajoittaa yhtä aikaa olevien lataustapahtumien ottamaa tehoa kustannustehokkaamman mitoituksen mahdollistamiseksi. Tehonrajoituksen seurauksena ajoneuvoja ei kuitenkaan saada ladattua yhtä paljon. Taulukossa 8 on esitetty tunnusluvut kauppakeskuksessa toimivalle latausjärjestelmälle, kun verkosta otettava teho rajoitetaan 43,47 kilowattiin, joka vastaa virraltaan 63 ampeeria.

Taulukko 8. Vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa verkosta otettava virta rajoitetaan 63 ampeeriin.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	186324,76	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	0	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	16769,23	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	0	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	0	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	184461,51	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	220299,40	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	35837,89	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukosta 8 nähdään toteutuvan latausenergian vähentyvän noin 83,7 %:iin, joka on edelleen hyvä taso. Tässä tulee myös huomioida kuormitushuipun suurimman arvon pieneneminen alle puoleen, minkä seurauksena saadaan madallettua sähköverkkoliittymän vaatimuksia ja latausjärjestelmän investointikustannuksia. Kuvassa 18 on esitetty tarkasteltavan järjestelmän kuormitustilanne.



Kuva 18. Kuormitus kesäpäivänä kauppakeskuksen latausjärjestelmässä, kun verkosta otettava teho rajoitetaan 43,47 kilowattiin.

Kuvasta 18 nähdään kuormituksen saavuttavan maksimiarvon ensimmäisen kerran 10:00, jolloin kuormanhallinta alkaa rajoittamaan latauspisteille syötettävää tehoa niin, että pysytään sallitussa rajassa. Kuvista 17 ja 18 voidaan myös nähdä, että verkosta otettavaa tehoa rajoittamattomassa tilanteessa on itse asiassa kello 14:00 pienempi teho, kuin vastaavalla hetkellä latausjärjestelmässä, jonka verkosta otettava tehoa rajoitetaan. Tämä on seurausta siitä, että suuremman kokonaistehon avulla saadaan ajoneuvojen akustot ladattua täyteen nopeammin. Koska täyteen ladattu ajoneuvo ei ota enempää energiaa, mutta saattaa vielä varata latauspisteen, on satunnaiset kuormituksen alenemat ja kuormitushuiput sekä suurempia että yleisempiä suuremmalla maksimilatausteholla.

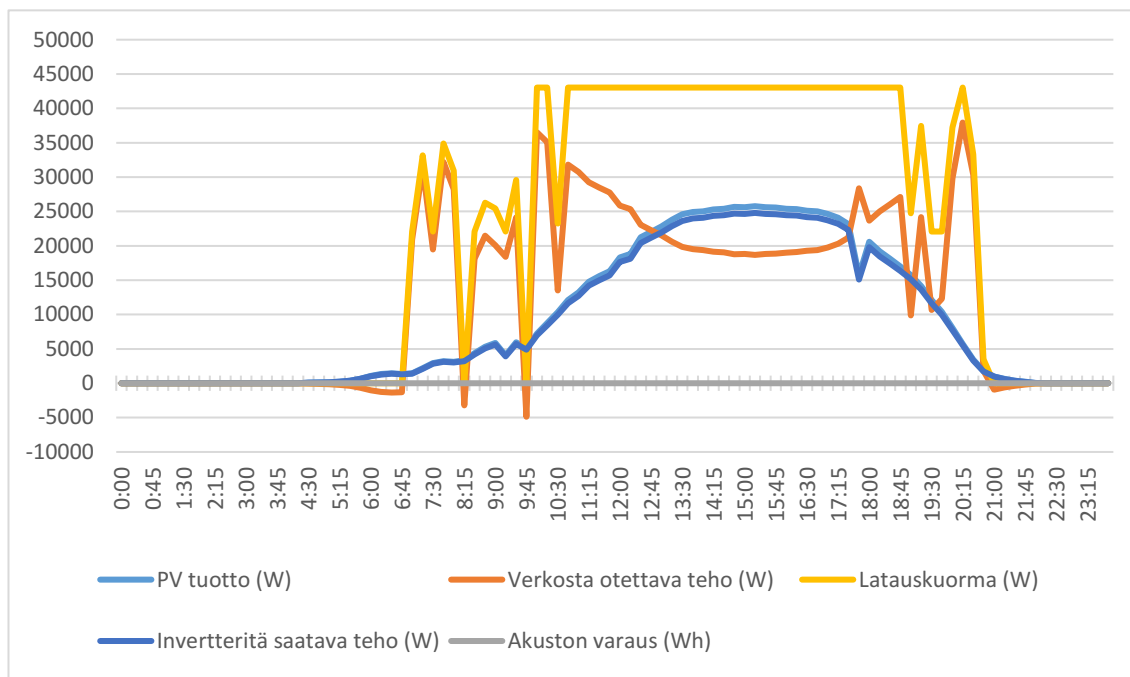
6.1.2 Aurinkosähkön tuoton vaikutus latausjärjestelmässä

Aurinkosähköä tai muuta paikallista tuotantoa voidaan kappaleen 2.6.1 mukaisesti hyödyntää niin, että joko vähennetään verkosta tarvittavaa tehoa tai kasvatetaan maksimilataustehoa. Mikäli latausjärjestelmän kuormanhallinta ei kasvata tehorajaa aurinkosähkön hetkellisen tuotannon avulla, paikallisen tuotannon vaikutus näkyy vain verkosta otettavassa ja verkkoon siirrettävässä energiassa. Taulukossa 9 on esitetty vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa kuormituksen teho on rajattu verkosta otettavan tehon mukaan ja aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti on 30 kW.

Taulukko 9. Vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti on 30 kW ja latauskuormitus rajoitetaan verkosta otettavan maksimitehon mukaan.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	161714,66	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	487,69	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	14554,32	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	14,63	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	26089,18	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	184461,51	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	220299,40	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	35837,89	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukoita 8 ja 9 vertaamalla nähdään toteutuvan latausenergian ja lataamatta jäävän energian pysyvän samana aurinkosähkön koosta riippumatta. Tällöin voidaan kuitenkin aurinkosähköjärjestelmästä saatava hyöty nähdä suoraan myytävän ja ostettavan sähkön arvosta. Mikäli sähkön ostohinta on 9 snt/kWh ja myyntihinta 3 snt/kWh, saadaan 30 kW:n aurinkosähköjärjestelmästä noin 2230 euron vuotuinen säästö. Jos kyseisen aurinkosähköjärjestelmän hinta on yhteensä noin 42 000 euroa ja käyttöaika noin 30 vuotta, tulee aurinkosähköjärjestelmän hankinta vähintäänkin lähelle kannattavaa tasoa. Aurinkosähköjärjestelmän tarkempi taloudellisuuden arviointi jätetään tässä työssä käsittelemättä, mutta siinä tulisi huomioida muun muassa aurinkopaneelien vanhenemisesta johtuva tehokkuuden väheneminen ja se, että invertterien käyttöaika saattaa olla selvästi aurinkosähköjärjestelmän muiden komponenttien käyttöaikaa lyhempi. Kuvassa 19 on havainnollistettu kesäpäivän kuormitusta edellä mainitussa järjestelmässä.



Kuva 19. Kuormitus kauppakeskuksen latausjärjestelmässä kesäpäivänä, kun aurinkosähköjärjestelmän koko on 30 kW ja latauskuormitus rajoitetaan verkosta otettavan maksimitohon mukaan.

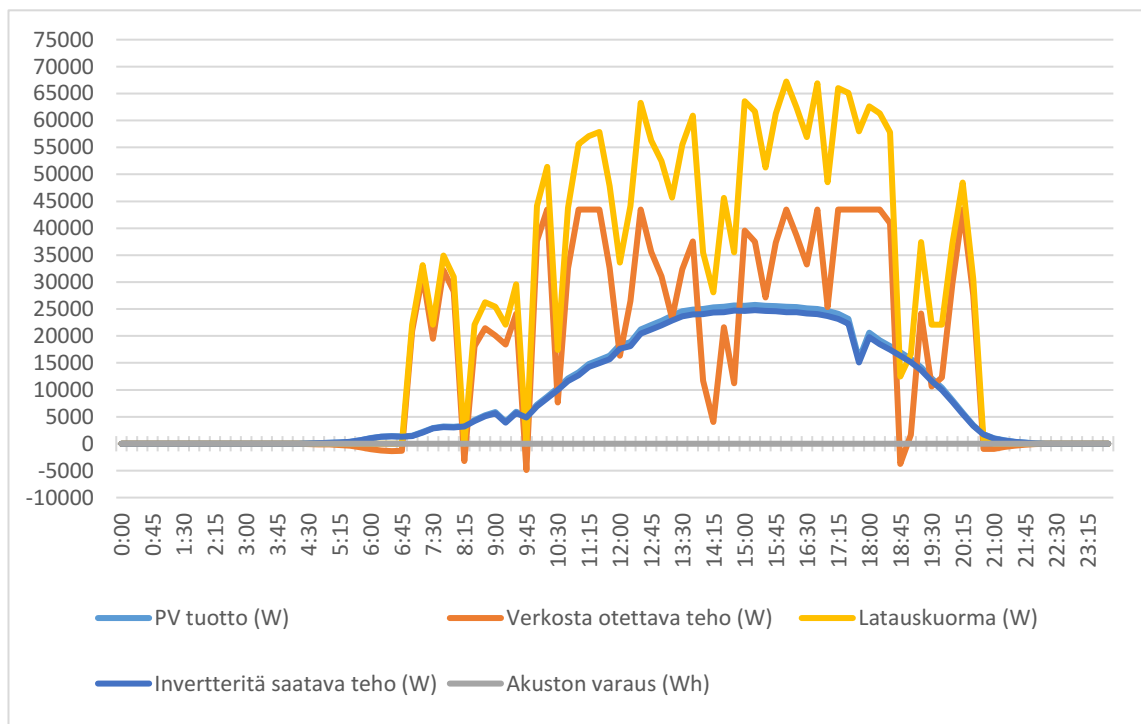
Kuvasta 19 voidaan nähdä, että kauppakeskuksen latausjärjestelmän kuormitus ajoittuu samalle ajanjaksolle aurinkosähkön tuoton kanssa. Koska latausjärjestelmän kuormitus on oletettu jatkuvan myös viikonloppuisin ja arkipyhinä, ei aurinkosähköä tarvitse syöttää verkkoon päin juuri ollenkaan. Aurinkosähköjärjestelmästä saadaankin tässä tapauksessa lähes ideaalinen hyöty, sillä aurinkosähkön tuotosta saatava taloudellinen hyöty on suurempi sen omakäytössä kuin myymisessä. Aurinkosähkön ja latausjärjestelmän kuormituksen ajoittuminen samalle ajanjaksolle voidaan myös päätellä taulukon 9 arvoista saatavasta omakäytön suuresta suhteesta, joka on noin 98,1 %. Kuvan 19 perusteella kyseinen latausjärjestelmä ja sen kuormitus voisi oletettavasti hyödyntää vielä noin 45 kW aurinkosähköjärjestelmästä saatavan tuoton lähes samalla omakäyttösuhteella. Tällöin tulee kuitenkin varmistaa, ettei verkkoon syötettävä teho ylitä järjestelmäkokonaisuuden syötön mitoitettua arvoa.

Jos paikallista tuotantoa hyödynnetäänkin siten, että latauskuormaa rajoitetaan verkosta otettavan tehon ja paikallisen tuotannon tehon summan mukaan dynaamisesti, voidaan ajoneuvoihin saada enemmän energiaa ladattua. Taulukossa 10 esitetty vuotuiset tunnusluvut latausjärjestelmälle, jonka 30 kW aurinkosähköjärjestelmän tuoton avulla kasvatetaan hetkellistä kokonaislataustehoa.

Taulukko 10. Vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti on 30 kW ja latauskuormitus rajoitetaan paikallisen tuotannon ja verkosta otettavan maksimitehon summan mukaan.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	174161,18	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	560,11	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	15674,51	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	16,80	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	26089,18	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	196711,87	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	220299,40	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	23587,53	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukoiden 9 ja 10 arvoista voidaan nähdä tämän muutoksen lähinnä kasvattavan verkosta otettavaa energiaa lähes 12500 kWh ja toteutuvaa latausenergiaa noin 12250 kWh, jolloin toteutuvan latausenergia suhde nousee 89,3 %:iin. Koska sähköajoneuvojen latausjärjestelmän tarkoitus on ladata sähköajoneuvoja, tulee suurempi toteutuva latausenergia huomioida jollain tavalla käyttökohteeseen optimaalista latausjärjestelmän mitoittamista suunniteltaessa. Suuremman lataustehon havainnollistamiseksi kuvassa 20 on esitetty kauppakeskuksessa toimivan latausjärjestelmän kuormitus kesäpäivänä.



Kuva 20. Kuormitus kauppakeskuksen latausjärjestelmässä kesäpäivänä, kun aurinkosähköjärjestelmän koko on 30 kW ja latauskuormitus rajoitetaan paikallisen tuotannon ja verkosta otettavan maksimitehon summan mukaan.

Kuvasta 20 voidaan nähdä verkosta otettavan tehon pysyminen tehorajan mukaisesti 43,47 kilowatissa tai sen alapuolella samalla kun kokonaislatausteho on selvästi suurempi. Sähköverkkoon liittyvä syöttö voi siis olla mitoitettu vain 43,47 kilowatin tehon mukaa, vaikka kokonaislatausteho voikin olla suurempi. Latausjärjestelmä tulee kuitenkin mitoittaa kestäämään suurin mahdollinen teho, mikä luonnollisesti nostaa latausjärjestelmän kustannuksia. Käyttökohteesta riippuen suuremman toteutuvan latausenergian hyöty saattaa kuitenkin olla merkittävämpi etu kuin kasvavista investointikustannuksista aiheutuva haitta.

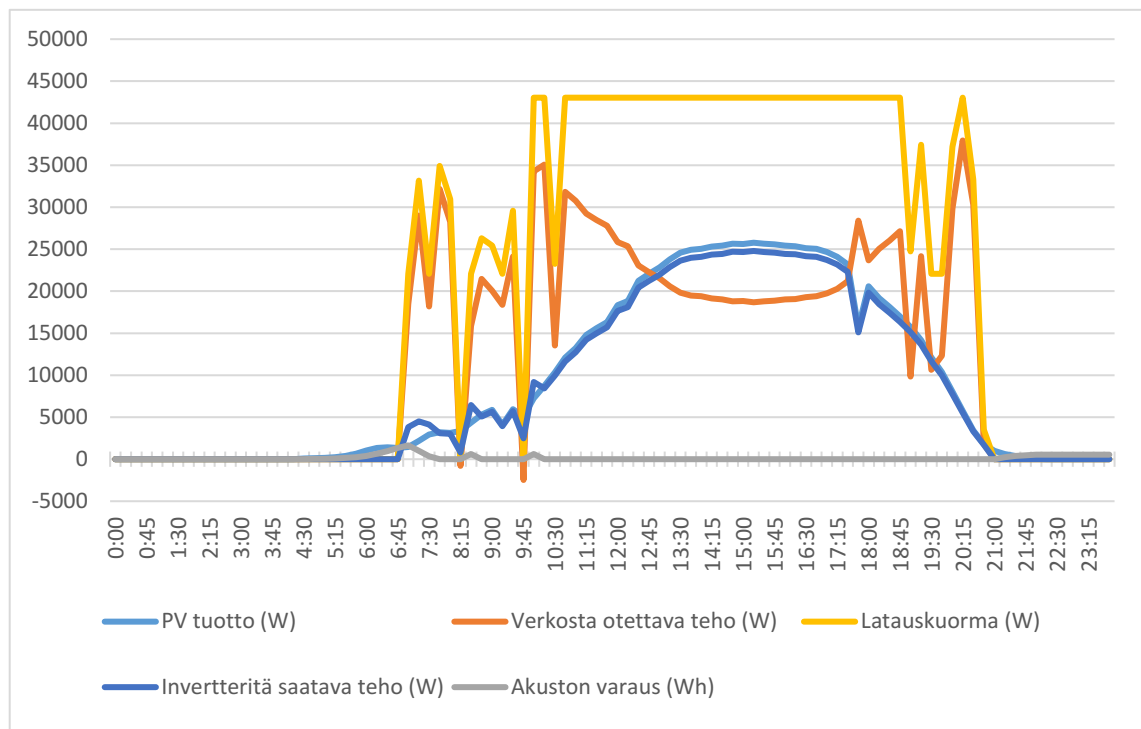
6.1.3 Akuston vaikutus latausjärjestelmässä

Tarkasteltavassa järjestelmässä on akuston tarkoitus maksimoida aurinkosähkön käyttö, jolloin verkosta otettava ja verkkoon syötettävä energia pienenee mahdollisimman paljon. Laskennassa käytetään liitteessä 2 mainitun MyReserve 800 -nimisen akuston mukaisia arvoja. Vaikka MyReserve on tarkoitettu pienemmille aurinkosähköjärjestelmille, voidaan sen avulla tarkastella riittävällä tasolla akuston vaikutuksia osana latausjärjestelmää silloinkin, kun käytössä on suurempi aurinkosähköjärjestelmä. Taulukossa 11 on esitetty latausjärjestelmän tunnusluvut, kun teholtaan 30 kW aurinkosähköjärjestelmän lisäksi on käytössä edellä mainittu 8.8 kWh akusto.

Taulukko 11. Vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti on 30 kW ja akuston kapasiteetti on 8.8 kWh.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	161343,35	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	88,12	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	14520,90	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	2,64	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	26089,18	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	184461,51	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	220299,40	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	35837,89	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukoiden 9 ja 11 eroista nähdään akuston vähentävän verkosta otettavan energian määrää ja verkkoon syötettävän energian määrää. Tällöin aurinkosähkön omakäyttö nousee 99,7 %:iin. Koska sähkön myyntihinta on oletettavasti vähemmän kuin sähkön ostohinta, johtaa kasvava omakäyttö myös kustannussäästöihin. Edellä mainituilla hinnoilla akustosta saatava taloudellinen hyöty jää kuitenkin noin 21 euroon vuodessa, joka taas on marginaalinen akuston investointikustannuksiin verrattuna. Tätä vähäistä hyötyä selittää aurinkosähkön tuoton ja kuormituksen ajoittuminen samalle hetkelle, jolloin aurinkosähkön omakäyttö on jo valmiiksi korkea. Kuvassa 21 on havainnollistettu tapauksen kuormitustilannetta kesäpäivänä.



Kuva 21. Kuormitus kesäpäivänä kauppakeskuksen latausjärjestelmässä, kun aurinkosähköjärjestelmän koko on 30 kW ja akuston kapasiteetti on 8,8 kWh.

Kuvien 19 ja 21 eroista voidaan havaita, että akusto pystyy tässä tapauksessa varastoimaan kokonaan aamulla ja illalla tuotetun ylimääräisen aurinkoenergian kyseisenä päivänä. Koska aamupäivällä kello 8:15 ja 9:45 ylimääräisen aurinkosähkön teho on suurempi kuin akuston maksimilatausteho, 2,5 kW, joudutaan osa ylimääräisestä tuotannosta syöttämään verkkoon. Kuvasta 21 voidaan nähdä myös, että akuston varaus ei nouse kovinkaan suureksi kyseisenä päivänä. Laskentaohjelman avulla saatiin selville, että kyseisessä järjestelmäkokonaisuudessa akuston suurin varaus tulisi olemaan noin 4,6 kWh. Tämä varaustila saavutettaisiin eräänä kesäaamuna juuri ennen latausjärjestelmän kuormituksen alkamisajankohtaa ja siihen vaikuttaa lähes yhtä paljon edeltävän illan kuin kyseisen aamun aurinkosähkön tuotto. Tässä tapauksessa saataisiin siis sama hyöty kapasiteetiltaan noin puolet pienemmästä akustosta kyseiseen 8,8 kWh akustoon verrattuna.

Laskentaohjelman avulla saatiin myös selville, että suurin hetkellinen aurinkosähkön tuoton ja kuormituksen erotus oli noin 8,5 kW edellä mainitussa tilanteessa. Mikäli tarkasteltavalla akustolla olisi suurin lataus- ja purkausteho esimerkiksi 10 kW, ei aurinkosähkön tuottoa tarvitsisi syöttää verkkoon ollenkaan. Taulukossa 12 on esitetty latausjärjestelmälle saatavat vuotuiset tunnusluvut tällaiselle tapaukselle.

Taulukko 12. Vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti on 30 kW ja akuston maksimi lataus- ja purkausteho on 10 kW.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	161261,45	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	0	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	14513,53	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	0	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	26089,18	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	184461,51	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	220299,40	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	35837,89	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukosta 12 voidaan havaita, että kyseisen akuston avulla aurinkosähkön omakäyttö nousee 100 %:iin. Tämä kuitenkin tuo latausjärjestelmälle säästöjä vain noin 26 euroa vuodessa verrattuna latausjärjestelmään, joka hyödyntää pelkkää 30 kW aurinkosähköjärjestelmää. Akustosta saataisiin suurempi hyöty, jos tuotanto ja kuormitus ajoittuisivat niin, että akustolle tulisi tiheämmin latauspurkaus-jaksoja. Mikäli esimerkiksi kuormitus ajoittuisi joka toiselle päivälle, tai jos kuormitus olisi kesken päivän nollassa, voisi akustolla olla merkittävämpikin vaikutus.

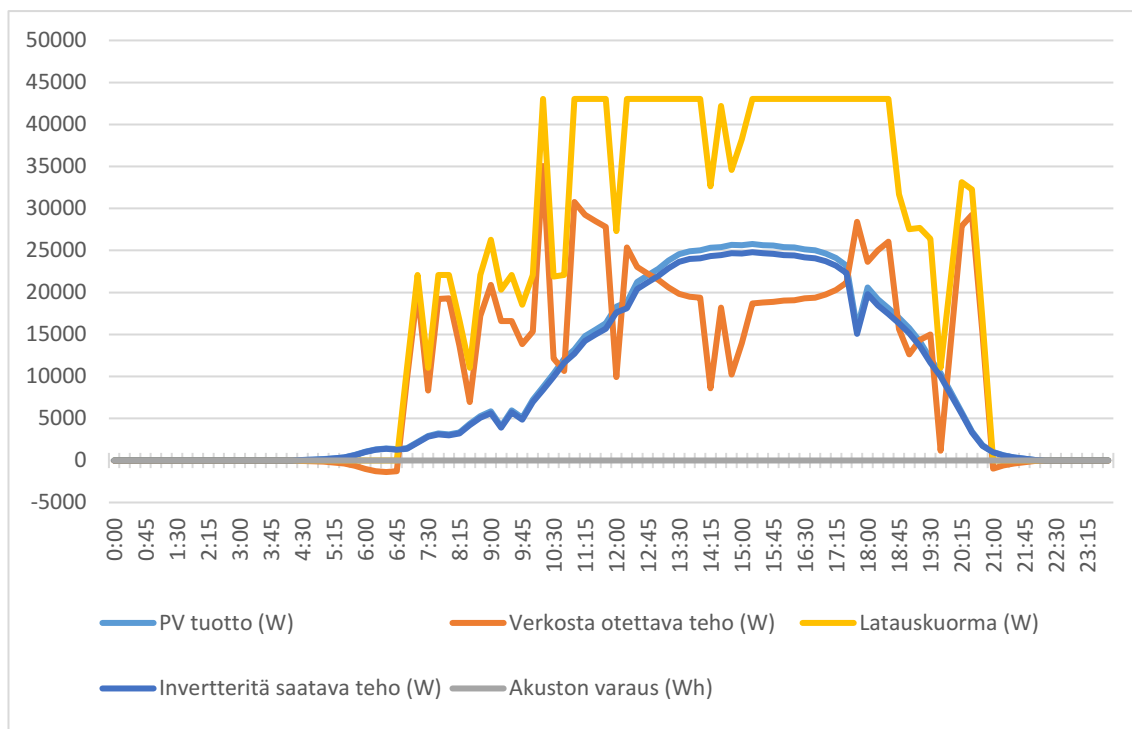
6.1.4 Teholtaan pienempien latauspisteiden käytön vaikutus

Edellisissä tuloksissa käytetyt latauspisteet olivat teholtaan 22 kW. Tehokkaammat latauspisteet vaativat luonnollisesti suuremmat investointikustannukset. Koska latauskuormat oletetaan ensisijaisesti kohtalaisen pieniksi, voi pienempitehoiset latauspisteet olla kustannustehokkaampi ratkaisu. Taulukossa 13 on esitetty kauppakeskuksen latausjärjestelmälle vuotuiset tunnusluvut, kun latauspisteiden teho on 11 kW ja aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti on 30 kW.

Taulukko 13. Vuotuiset tunnusluvut kauppakeskuksen latausjärjestelmälle, jossa latauspisteiden teho on 11 kW ja aurinkosähköjärjestelmän kapasiteetti on 30 kW.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	146237,84	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	208,33	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	13161,41	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	6,25	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	26089,18	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	169416,02	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	220299,40	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	50883,38	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukon 9 ja 13 arvoista voidaan nähdä, että pienempien latauspisteiden käyttäminen johtaa toteutuvan latausenergiasuhteen vähenevän tässä tapauksessa 83,7 %:sta 76,9 %:iin. Sekä verkosta otettava energia että toteutuva latausenergia vähenee noin 15 MWh, minkä hyöty tai haitta riippuu tapauksesta. Kokonaisuudessaan tämän muutoksen kannattavuudessa tulee huomioida vielä muitakin tekijöitä, kuten täyssähköajoneuvojen mahdollinen yleistymisen, jolloin suurempitehoisilla latauspisteillä saattaa olla suurempi markkina-arvo. Kuvassa 22 on havainnollistettu kesäpäivän kuormitusta edellä mainitulla parametreilla.



Kuva 22. Kuormitus kesäpäivänä kauppakeskuksen latausjärjestelmässä, kun latauspisteiden teho on 11 kW.

Kuvasta 22 nähdään kokonaistehon pysyvän asetetussa maksimitheorajassa melkein kokonaan ruuhkaisimpana aikana, mikä viittaa latausjärjestelmän edelleen hyödyntävän maksimilataustehoa hyvin. Pienemmän latauspistekohtaisen tehon nähdään tasoittavan ruuhkattomien aikojen lataustehoja, koska ajoneuvoja ei enää ehditä lataamaan täyteen niin nopeasti ja niiden latausaika pitkittyy.

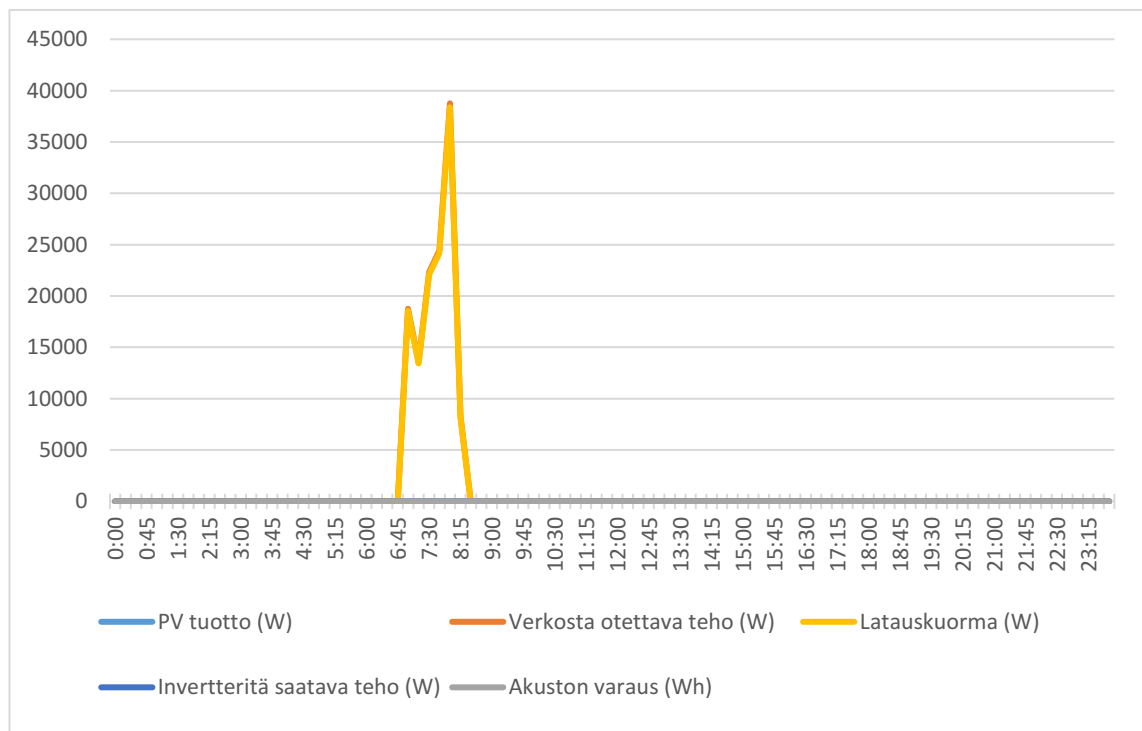
6.2 Työpaikan latausjärjestelmä

Työpaikalla toimivalle latausjärjestelmälle on oletettu huomattavasti pienempi kuormitus kuin kauppakeskuksen tapauksessa. Lisäksi kuormitus ajoittuu ilman minkäänlaista ohjausta voimakkaasti aamulle. Lähtökohdan selventämiseksi tarkastellaan ensin latausjärjestelmää, jossa latauspisteiden teho on 22 kW ja verkosta otettavaa teho ei rajoiteta. Näin saatavat tulokset on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Vuotuiset tunnusluvut latausjärjestelmässä, kun latauspisteiden teho on 22 kW.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	8193,94	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	0	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	737,45	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	0	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	0	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	8112,00	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	8112,00	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	0	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukosta 14 nähdään ajoneuvojen akustojen latautuvan täyteen. Kuvassa 23 on esitetty yhden vuorokauden kuormitus tilanne, josta voidaan havaita akustojen latautuvan täyteen alle kahdessa tunnissa käytännössä yhden kuormituspiikin aikana.

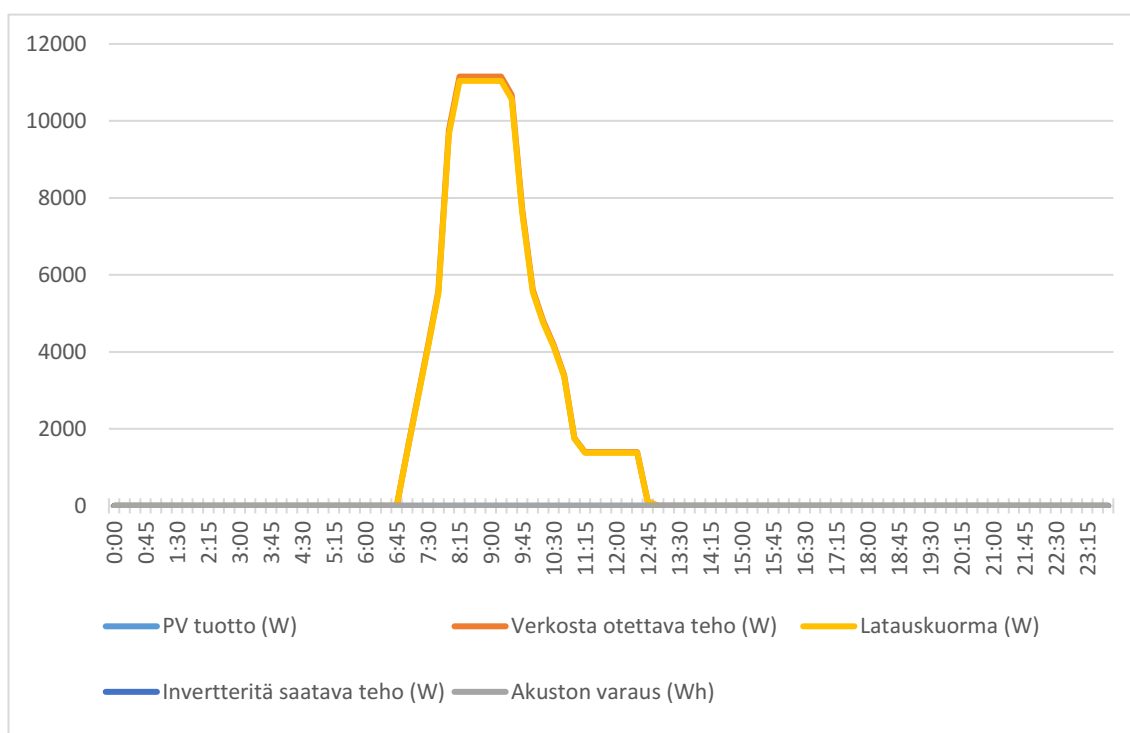


Kuva 23. Kuormitus työpaikan sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä.

Samalla voidaan havaita kuormitushuipun pysyvän tehorajan alapuolella. Työpaikan latauspisteiden kuormitusta kuvaavassa mallissa oletettiin työajan sisältävän liukumaa. Mikäli kaikki työntekijät saapuisivat esimerkiksi vartin aikana, voi kuormitushuippu olla huomattavasti suurempi. Tämä ei kuitenkaan ole erityisen ratkaisevaa, sillä latausjärjestelmä tulee mitoittaa suurimman mahdollisen kuorman mukaan joka tapauksessa, kuten aiemmin mainittiin.

6.2.1 Pienemmän lataustehon hyödyntäminen

Joissain tapauksissa edellä mainittu, alle kahden tunnin, latausaika on tarpeen. Mikäli nopeammasta ajoneuvojen latauksesta ei kuitenkaan saada käyttökohteessa merkittävää lisäarvoa, voidaan latausjärjestelmä muodostaa matalatehoisemmista latauspisteistä. Jos latauspisteet hyödyntävät yksivaiheista 6 ampeerin latausta eli 1,38 kW lataustehoa, saadaan samat vuotuiset tunnusluvut kuin taulukossa 14. Tällöin kuitenkin kuormitushuippu on huomattavasti alhaisempi ja latausaika pidempi, joka voidaan havaita kuvasta 24.



Kuva 24. Kuormitus työpaikan sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä, kun latauspisteiden teho on 1,38 kW.

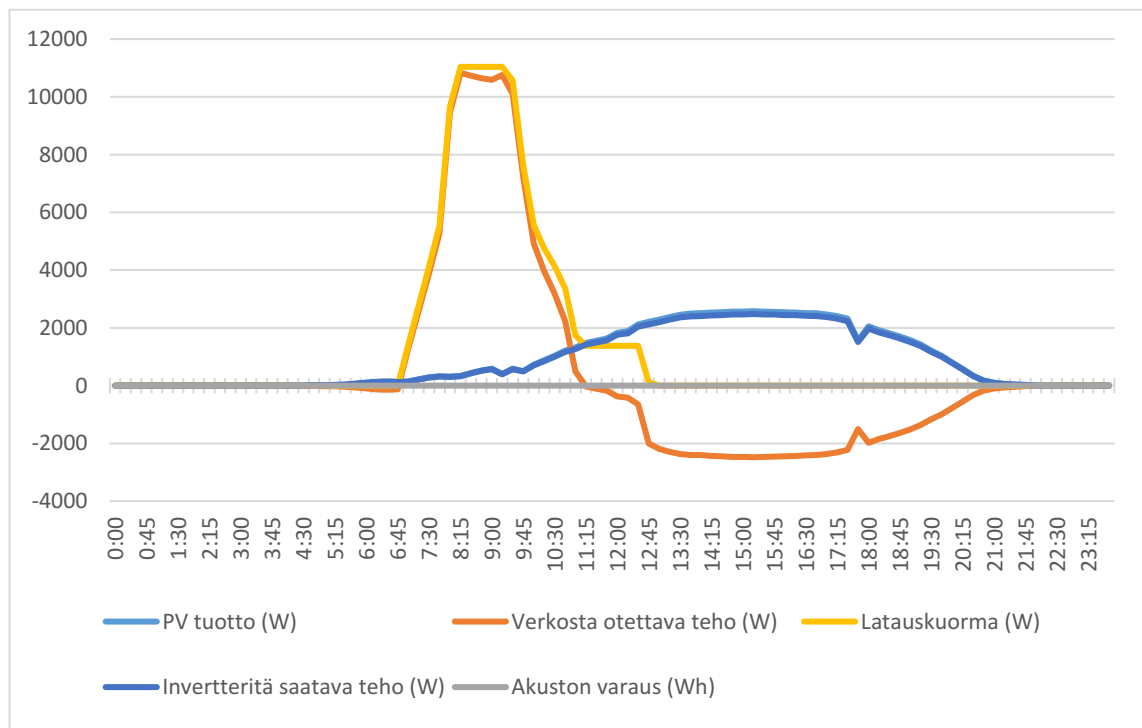
Tässä tapauksessa kuormanhallinta ei voi säätää latauspisteiden yhteistehoa muuten kuin keskeyttämällä lataustapahtumia, joka jätetään kuitenkin tarkastelun ulkopuolelle kappaleessa 2.6.3 mainitusta syystä johtuen. Tarkasteltava 1,38 kW latausteho tarkoittaa kahdeksassa tunnissa ajoneuvon latautuvan noin 10 kWh, mikäli ajoneuvon ajoakun latauksen hyötysuhde on 90 %. Kuten kappaleessa 5.1 olleesta taulukosta 6 voidaan nähdä, saadaan 10 kWh:lla monessa tapauksessa hybridiajoneuvo ladattua täyteen. Täyssähköautojen tapauksessa 10 kWh ei kuitenkaan ole riittävä, kun kuljettava matka on yli 40 km, koska ajoneuvolla ei ole muuta energialähdettä matkan jatkamiseksi. Tämä tulisi huomioida jollain tavalla latausjärjestelmää suunniteltaessa.

6.2.2 Aurinkosähkön tuoton vaikutus latausjärjestelmässä

Aurinkosähkön avulla saatava hyöty ei ole yhtä suuri työpaikalla toimivassa latausjärjestelmässä kuin kauppakeskuksessa, kun ei huomioida latausjärjestelmän ulkopuolista kuormaa. Tämän havainnollistamiseksi taulukossa 15 on vuotuiset tunnusluvut ja kuvassa 26 on kesäpäivän kuormitus latausjärjestelmässä, kun kappaleen 6.2.1 mukaiseen tilanteeseen on lisätty 3 kW aurinkosähköjärjestelmä.

Taulukko 15. Vuotuiset tunnusluvut latausjärjestelmässä, kun latauspisteiden teho on 1,38 kW ja aurinkosähköjärjestelmän teho on 3 kW.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	7746,11	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	2061,95	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	697,15	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	61,86	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	2608,92	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	8112,00	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	8112,00	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	0,00	$E_{Load,max} - E_{load}$



Kuva 25. Kuormitus työpaikan sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä, kun latauspisteiden teho on 1,38 kW ja aurinkosähköjärjestelmän teho on 3 kW.

Taulukon 15 arvoista aurinkosähkön omakäytöksi saadaan vain 17,8 %, joka on huomattavasti huonompi kuin kauppakeskukselle saadut omakäytön arvot. Kuvasta 26 nähdään aurinkosähkön tuoton ajoittuvan latauskuorman jälkeen, jolloin se syötetään suurimmaksi osaksi verkkoon. Vaihtoehtona akuston käytölle aurinkosähkön omakäyttöä voisi parantaa esimerkiksi viivästyttämällä lataustapahtumien aloitusta. Tällöin enemmän energiaa tarvitsevat ladattavat ajoneuvot saattavat kuitenkin jäädä latautumatta täyteen.

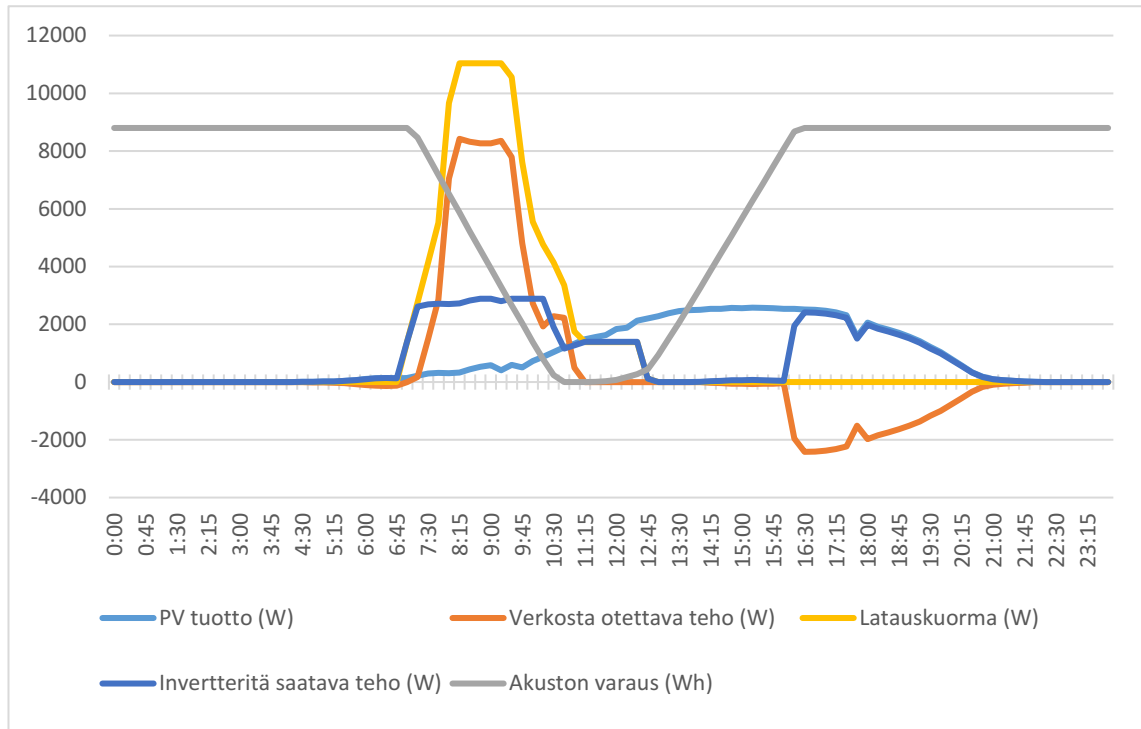
6.2.3 Akuston vaikutus latausjärjestelmässä

Kappaleen 6.2.2 mukaisessa tilanteessa on selvä ero kuormituksen ja tuotannon ajankohdalla jokaisena päivänä, kun latausjärjestelmää kuormitetaan. Tällöin akuston käytössä saadaan tiheämmin selkeitä varaus- ja purkaus jaksoja, minkä seurauksena verkkoon syötettävä ja verkosta otettava energia vähenee enemmän. Tämä johtaa edelleen käyttökustannussäästöihin, kun sähkön ostohinta on myyntihintaa suurempi. Taulukossa 16 on vuotuiset tunnusluvut, kun kappaleen 6.2.2 mukaiseen järjestelmäkokonaisuuteen on lisätty 8,8 kWh akusto.

Taulukko 16. Vuotuiset tunnusluvut latausjärjestelmässä, kun latauspisteiden teho on 1,38 kW, aurinkosähköjärjestelmän teho on 3 kW ja akuston kapasiteetti on 8,8 kWh.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Verkosta otettava kokonaisenergia (kWh)	6664,02	$E_{Grid,f}$
Verkkoon syötettävä kokonaisenergia (kWh)	897,15	$E_{Grid,t}$
Verkosta otettavan sähkön ostoarvo (€)	599,76	$C_{E,Grid,f}$
Verkkoon syötettävän sähkön myyntiarvo (€)	26,91	$C_{E,Grid,t}$
Aurinkosähkön tuotto (kWh)	2608,92	E_{PV}
Toteutuva latausenergia (kWh)	8112,00	E_{load}
Ajoneuvoihin yhteensä mahtuva energia (kWh)	8112,00	$E_{Load,max}$
Lataamatta jäävä energia (kWh)	0,00	$E_{Load,max} - E_{load}$

Taulukoista 15 ja 16 voidaan nähdä akuston parantavan aurinkosähkön omakäyttöä 17,8 %:sta jopa 64,3 %:iin. Tämä on osittain seurausta akuston suhteellisen suuresta kapasiteetista suhteessa aurinkosähköjärjestelmään. Lisäksi järjestelmän kuormituksen ja aurinkosähkön tuotannon ajoitus ovat sopivat siihen, että akusto pääsee päivittäisessä syklissä purkautumaan ja varautumaan. Akustosta saatavat kustannussäästöt eivät vielä kuitenkaan ole kuin noin 62 euroa vuodessa, kun käytetään liitteen 2 mukaisia sähkön osto- ja myyntihintoja. Tämä ei akustojen nykyhinnoilla tule kannattavaksi. Kuvassa 26 on kesäpäivän kuormitus kyseisestä latausjärjestelmästä.



Kuva 26. Kuormitus työpaikan sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä, kun latauspisteiden teho on 1,38 kW, aurinkosähköjärjestelmän teho on 3 kW ja akuston kapasiteetti 8,8 kWh.

Kuvasta 26 voidaan nähdä akuston ensin purkautuvan kokonaan aamulla latauskuorman syöttämistä varten ja latautuvan takaisin täyteen iltapäivällä tuotetulla aurinkosähköllä. Vasta akuston täyteen varautumisen jälkeen osa aurinkosähkön tuotosta syötetään verkkoon.

7 Yhteenveto

Tässä diplomityössä on tarkasteltu älykästä sähköajoneuvojen latausjärjestelmää, joka hyödyntää aurinkosähköä ja akustoa sähköverkosta otettavan tehon ohella. Sähköajoneuvojen latauslaitteita tarkasteltiin yleisten teknisten vaatimusten sekä älykkään kuormanhallinnan vaatimusten kannalta. Tarkasteluun sisältyi aiheeseen liittyvien säädöksiä ja määräyksiä selvittäminen. Järjestelmäkokonaisuutta arvioitiin myös sitä varten toteutetulla laskentaohjelmalla.

Sähköajoneuvot eivät vielä ole kovinkaan yleisiä Suomessa, mutta niiden määrä on huomattavassa kasvussa. Nykyisellä tahdilla täyssähköajoneuvot ja ladattavat hybridit muodostavat merkittävän osan Suomen liikennekäytössä olevista ajoneuvoista 5–10 vuoden päästä. Tällä hetkellä ladattavat hybridit ovat huomattavasti suositumpia, joka on seurausta siitä, että niiden hintataso on jo lähellä ominaisuuksiltaan vastaavien polttomoottoriajoneuvojen hintatasoa. Täyssähköajoneuvojen kallis hinta johtuu ajoakkujen korkeasta hintatasosta. Erityisesti täyssähköautojen yleistymistä hidastaa vielä kunnollisen latausinfrastruktuurin puute.

Ladattavien ajoneuvojen määrän kasvu liikenteessä johtaa latausasemien kasvavaan tarpeeseen, joka on ollut havaittavissa viime aikoina. Hidas lataus, jota hyödynnetään erityisesti kotilatauksessa, vaikuttaa olevan yleisin latausmuoto tämän työn valmistumisen aikana. Vaikka hitaan kotilatauksen onkin odotettu pysyvän pitkään suosituimpana lataustapana pitkään, on suurempitehoiset latausasemat myös yleistymässä. Latausasemien latauspisteiden tehon kasvaessa nousee nopeasti myös verkosta otettava maksimiteho, mikäli sitä ei säädellä mitenkään. Tämän vuoksi latausjärjestelmiltä vaaditaan yhä useammin älykkyyttä, jonka avulla voidaan toteuttaa kustannustehokkaampia latausratkaisuja. Tässä työssä tehty tarkastelu keskittyi puolinopeaan lataustapaan 3, joka hyödyntää ajoneuvon ja latauslaitteen välillä tiedonsiirtoa mahdollistaan kuormituksen rajoittamisen halutun arvon alapuolelle. Tarkastelu kohdistui myös latauskeskusmalliin, jonka tarkoitus on keskittää sähköajoneuvojen latauslaitteilta vaadittavia toimintoja yhteen. Tähän liittyen toteutettiin tarkempi yrityksen sisäiseen käyttöön jäävä suunnitelma latauskeskuksen automaatio-ratkaisusta.

Aurinkosähkö on myös ollut selvästi kasvussa jo useiden vuosien ajan ja osoittautunut kustannustehokkaaksi energian tuotantomuodoksi. Auringosta saatava tuotanto ei kuitenkaan usein osu samalle ajankohdalle kulutuksen kanssa, joka luo tarpeen energian varastolle. Koska akustot ovat kehittyneet nopeaa tahtia ja ne omaavat tämän työn aiheen kannalta ratkaisevia hyviä ominaisuuksia, otettiin ne aurinkosähkön ohella tarkastelun

kohteeksi. Näistä molemmista pyrittiin selvittämään ratkaisevat ominaisuudet, jotka tulee huomioida niiden käytössä osana sähköajoneuvojen latausjärjestelmää.

Järjestelmäkokonaisuuden kustannustehokkaan mitoittamisen arvioimiseksi toteutettiin laskentaohjelma. Laskentaohjelma hyödyntää mitattua aurinkosähkön tuottoa kokonaisen vuoden ajalta ja latauspisteiden kuormituksen arviointia varten luotuja malleja, joiden avulla voidaan laskea muun muassa ajoneuvoihin latautuva energia ja verkosta otettava energia. Tarkastelu keskittyi latausjärjestelmään, joka toimii kauppakeskuksessa tai työpaikalla. Molemmille tapauksille luotiin oma oletusmalli latauspisteiden kuormituksesta. Erilaisten tilanteiden arvioimiseksi tehtiin useita laskelmia, joita voitiin vertailla keskenään. Laskentaohjelma pyrittiin toteuttamaan niin, että siinä voidaan mahdollisimman helposti ottaa tarvittaessa todellisen käyttökohteen ominaisuudet huomioon laskentatuloksen parantamiseksi.

Oletuslähtötietojen avulla tehtyjen tulosten avulla voidaan kuitenkin tehdä joitain päätelmiä. Esimerkiksi akustot eivät kovinkaan todennäköisesti ole kustannustehokkaita vain aurinkosähkön omakäytön kasvattamisessa. Tämä johtuu akustojen kalliista hinnasta suhteessa sähkön osta- ja myyntihinnan erotukseen. Aurinkosähköjärjestelmä sen sijaan osoittautui hyvällä todennäköisyydellä kannattavaksi erityisesti silloin, kun tarkasteltiin kauppakeskuksessa toimivaa sähköajoneuvojen latausjärjestelmää. Erisuuruisten latauspisteiden lataustehojen tarkastelun tuloksena voidaan olettaa kauppakeskuksen latausjärjestelmälle sopivan 22 kW tai 11 kW tehoiset latauspisteet. Toisaalta, työpaikalla oletetun 8 tunnin pysähdysajan vuoksi voidaan siellä käytettävässä latausjärjestelmässä hyödyntää jopa pienintä latausnopeutta, mikäli täyssähköajoneuvojen mahdollisesti suurempaa latausenergiatarvetta ei ole tarvetta huomioida. Yleisesti laskentaohjelman voidaan todeta helpottavan järjestelmäkokonaisuuden kuormituksen hahmottamista.

Lähteet

- [1] T. Bohn, C. Cortes and H. Glenn, "Local automatic load control for electric vehicle smart charging systems extensible via OCPP using compact submeters," 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago, IL, 2017, pp. 724-731.
- [2] M. S. Islam, N. Mithulananthan and K. Bhumkittipich, "Feasibility of PV and battery energy storage based EV charging in different charging stations," 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, 2016, pp. 1-6.
- [3] M. S. Islam, N. Mithulananthan, K. Bhumkittipich and A. Sode-yome, "EV charging station design with PV and energy storage using energy balance analysis," 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), Bangkok, 2015, pp. 1-5.
- [4] G.R. Chandra Mouli, P. Bauer, M. Zeman, "System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces", Applied Energy, Volume 168, 2016, Pages 434-443.
- [5] Hallituksen tavoite: Suomessa on ainakin 250 000 sähköautoa vuonna 2030 [WWW]. [Viitattu 3.3.2018] Saatavissa: <https://www.aamulehti.fi/kotimaa/hallituksen-tavoite-suomessa-on-250-000-sahkoautoa-vuonna-2030-24089590/>
- [6] Ajoneuvokannan käyttövoimia [WWW]. [Viitattu 29.1.2018] Saatavissa: https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot
- [7] Energiatuki sähköautoille ja latauslaitteille oli menestys [WWW]. [Viitattu 1.3.2018] Saatavissa: <http://sahkoinenliikenne.fi/uutiset/energiatuki-sahkoautoille-ja-latauslaitteille-oli-menestys>
- [8] Valtio tukee sähköauton ostoa ja tuo romutuspalkkion takaisin [WWW]. [Viitattu 1.3.2018] Saatavissa: <https://op.media/talous/Autot-ja-liikenne/Valtio-tukee-sahkoauton-ostoa-ja-tuo-romutuspalkkion-takaisin-Lue-miten-paaset-osalliseksi-rahapotista-6d2185d93d2c432b90d2e07887c57798>
- [9] Aspects of Electric Vehicles and Demand Response in Electricity Grids, Antti Rautiainen, Tampereen teknillinen yliopisto, Julkaisu 1327, Tampere 2015
- [10] Chargemap, Statistics [WWW]. [viitattu 4.1.2018] Saatavissa: <https://chargemap.com/about/stats>
- [11] Huoltoasemien määrä [WWW]. [Viitattu 29.1.2018] Saatavissa: <http://www.oil.fi/fi/tilastot-4-huoltoasemat/41-huoltoasemien-maara>
- [12] Sähköautojen vaikutukset sähköverkkoyhtiön jakeluverkkoon ja liiketoimintaan, Antti Tammi, Maaliskuu 2011

- [13] Sähköautojen vaikutukset kaupungin sähkönjakeluverkkoon, Ari Unkuri, Toukokuu 2011
- [14] 250 000 sähköautoa tulee – kaatuuko kantaverkko? [WWW]. [Viitattu 3.3.2018] Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/250-000-sahkoautoa-tulee-kaatuuko-kantaverkko/>
- [15] YRITYSTEN INVESTOINTITUKI SÄHKÖAUTOJEN JULKISILLE LATAUSPISTEILLE [WWW]. [viitattu 28.12.2017] Saatavissa: <http://lataustuki.fi/>
- [16] Lataussuositus 2014 – SESKO ry [WWW]. [Viitattu 4.3.2018] Saatavissa: http://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_latausjarjestelmat/lataussuositus_2014
- [17] Sähköauton lataaminen ja latauspisteiden toteutus, ST 51.90, Sähkötieto ry, Sähköinfo Oy
- [18] Load Control System of an EV Charging Station Group, Antti Rautiainen et al., Nordac 2014.
- [19] Performance Evaluation of PLC over the IEC 61851 Control Pilot Signal, Christian Lewandowski, et al., 2011
- [20] Charging technology for E-Mobility: Product overview 2017 [WWW]. [viitattu 4.1.2018] Saatavissa: https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_promotion/520_06703_EN_DE_E-Mobility_LoRes.pdf
- [21] Porsche installs first ultra-fast 350 kW EV charging station [WWW]. [Viitattu 8.2.2018] Saatavissa: <https://electrek.co/2017/07/14/porsche-350-kw-ev-charging-station/>
- [22] Porsche Mission E: here's how you'll charge the electric supercar [WWW]. [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/motor-shows-events/frankfurt/2015/porsche-mission-e-the-pure-electric-sports-car-shocks-frankfurt/>
- [23] New 'ultra-fast 350 kW charging stations' for EVs to be deployed in Europe in partnership with Audi, BMW and others [WWW]. [Viitattu 9.2.2018] Saatavissa: <https://electrek.co/2016/10/18/new-ultra-fast-charging-350-kw-stations-evs-europe-audi-bmw/>
- [24] High Power Charging: CCS-base fast charging with 500 A [WWW]. [viitattu 4.1.2018] Saatavissa: https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_promotion/520_07586_EN_HQ_E-Mobility_LoRes.pdf
- [25] G. R. Nagendra, G. A. Covic and J. T. Boys, "Determining the Physical Size of Inductive Couplers for IPT EV Systems," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 571-583, Sept. 2014.

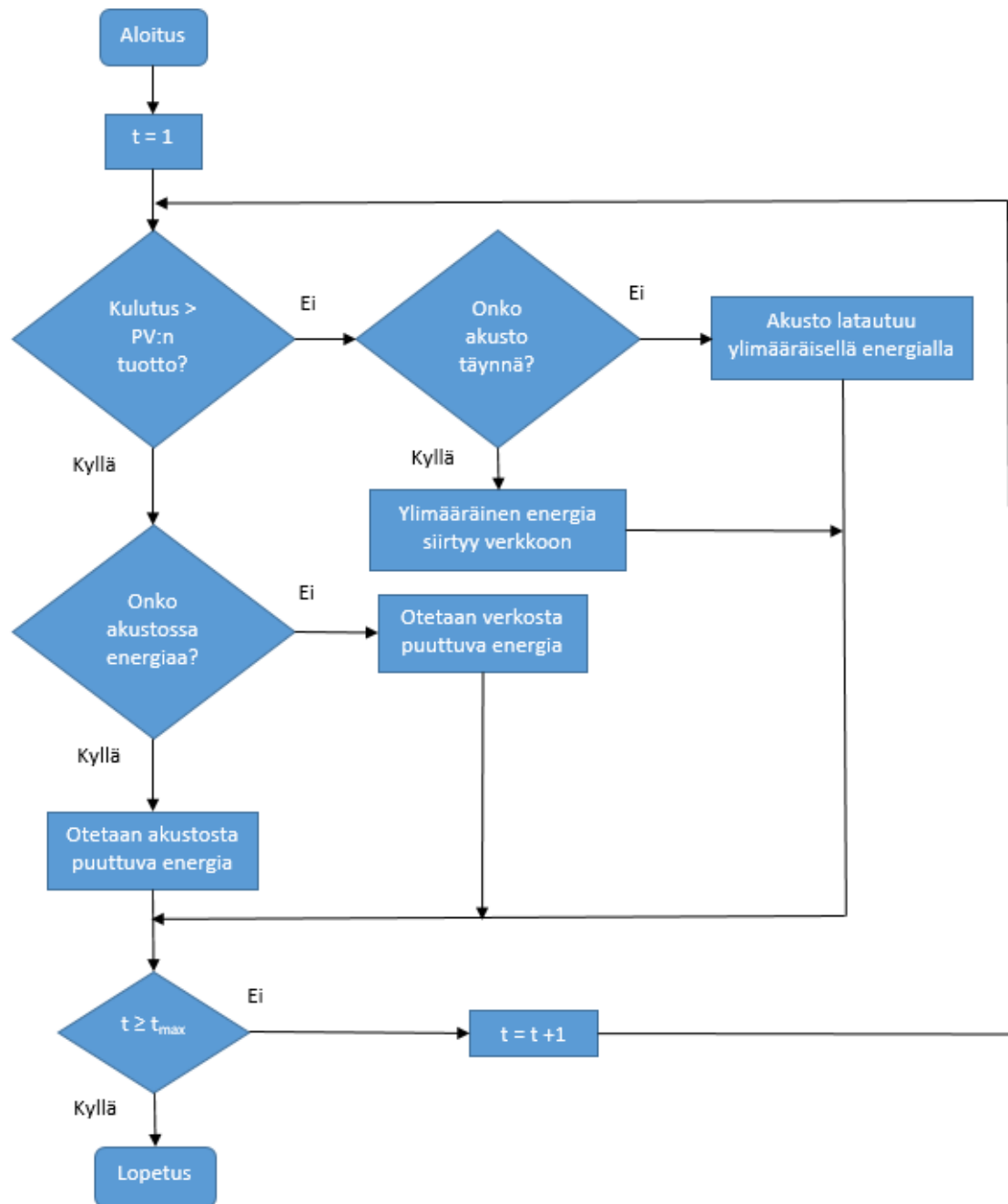
- [26] PLUGLESS FOR BMW I3 FAQs [WWW]. [viitattu 28.12.2017] Saatavissa: <https://www.pluglesspower.com/learn/plugless-for-bmw-i3-faq/>
- [27] Anonymous "Better Place Unveils EV Battery Swap Station," *Advanced Battery Technology*, vol. 45, (6), pp. 5, 2009.
- [28] Bankrupt battery-swapping startup for electric cars purchased by Israeli company [WWW]. [Viitattu 24.3.2018] Saatavissa <https://www.mercurynews.com/2013/11/21/bankrupt-battery-swapping-startup-for-electric-cars-purchased-by-israeli-company/>
- [29] Battswap | Battery Swap System for electric cars [WWW]. [Viitattu 17.2.2018] Saatavissa: <http://battswap.com/>
- [30] FAQ [WWW]. [Viitattu 17.2.2018] Saatavissa: <http://greenwayoperator.com/faq/#1446687867692-1efd49cb-06bf>
- [31] Sähköajoneuvot Suomessa – selvitys, Biomeri Oy, 2009
- [32] Electric mobility on the Advance: Mennekes supplies 800 charging points for major project in Oslo [WWW]. [Viitattu 8.2.2018] Saatavissa: [http://www.mennekes.co.uk/index.php?id=latest&tx_ttnews\[tt_news\]=1038&cHash=e53c5cc93aac1c851ca900e9f12b0479](http://www.mennekes.co.uk/index.php?id=latest&tx_ttnews[tt_news]=1038&cHash=e53c5cc93aac1c851ca900e9f12b0479)
- [33] Open Charge Point Protocol 1.6 [WWW]. [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <http://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp/ocpp-16/>
- [34] OCPP 2.0 ready for public review! [WWW]. [viitattu 18.12.2017] Saatavissa: <http://www.openchargealliance.org/news/ocpp-20-ready-for-public-review/>
- [35] Sähköpostikeskustelu 26.2.2018, Ville Tikka, LUT Green Campus
- [36] AURINKOENERGIAN TUET [WWW]. [Viitattu 19.1.2018] Saatavissa: <http://www.aurinkomaisema.com/Blogi/2017/01/05/aurinkoenergian-tuet/>
- [37] REN (2016). "RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT REN21." Saatavissa: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf
- [38] Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti yli kolminkertaistui vuodessa [WWW]. [Viitattu 19.1.2018] Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/-/sahkooverkkoon-kytketty-aurinkosahkokapasiteetti-yli-kolminkertaistui-vuodessa>
- [39] IRENA (2016). "Roadmap for Renewable Energy Future" Saatavissa: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REmap_2016_edition_report.pdf
- [40] Erdem Elibol, Özge Tüzün Özmen, Nedim Tutkun, Oğuz Köysal, Outdoor performance analysis of different PV panel types, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 67, 2017, Pages 651-661, ISSN 1364-0321

- [41] Auringonsäteilyn määrä Suomessa [WWW]. [viitattu 10.1.2018] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa
- [42] Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa [WWW]. [viitattu 10.1.2018] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>
- [43] H?berlin, Heinrich, and Heinrich Häberlin. Photovoltaics System Design and Practice, John Wiley & Sons, Incorporated, 2012.
- [44] Haghdadi, Navid & Copper, Jessie & Bruce, Anna & Macgill, Iain. (2016). Operational performance analysis of distributed PV systems in Australia.
- [45] Amit Kumar Yadav, S.S. Chandel, Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 23, 2013, Pages 503-513
- [46] S. Armstrong, W.G. Hurley, A new methodology to optimise solar energy extraction under cloudy conditions, Renewable Energy, Volume 35, Issue 4, 2010, Pages 780-787
- [47] Aurinko Opas – 01 Auringon perustiedot [WWW]. [Viitattu 18.12.2017] Saatavissa: http://www.aurinkoteknillinenyhdistys.fi/?page_id=148
- [48] Saban Yilmaz, Hasan Riza Ozcalik, Osman Dogmus, Furkan Dincer, Oguzhan Akgol, Muharrem Karaaslan, Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 43, 2015, Pages 997-1005
- [49] Mazen M. Abu-Khader, Omar O. Badran, Salah Abdallah, Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 3, 2008, Pages 864-873
- [50] Salah Abdallah, The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics, Energy Conversion and Management, Volume 45, Issues 11–12, 2004, Pages 1671-1679
- [51] D. Heim, "The simultaneous effect of the operating temperature and solar radiation on the efficiency of photovoltaic panels," *Archives of Civil Engineering*, vol. LVII, (3), pp. 261, 2011.
- [52] NREL, PVWatts Calculator [WWW]. [viitattu 7.1.2018] Saatavissa: <http://pvwatts.nrel.gov/>
- [53] Yaw-Juen Wang, Po-Chun Hsu, An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells, Energy, Volume 36, Issue 5, 2011, Pages 3069-3078, ISSN 0360-5442

- [54] H. Patel and V. Agarwal, "MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, March 2008.
- [55] Output Power Variation and Mismatch Losses of Photovoltaic Power Generators Caused by Moving Clouds, Kari Lappalainen, Tampereen teknillinen yliopisto, Julkaisu 1506, Tampere 2017
- [56] Standard Test Conditions (STC): definition and problems [WWW]. [viitattu 5.1.2018] Saatavissa: <http://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>
- [57] Plug In Electric Vehicles in Smart Grids : Energy Management, edited by Sumedha Rajakaruna, et al., Springer Singapore, 2014. ProQuest Ebook Central
- [58] M.Armand, J.-M. Tarascon, 2008, "Building better batteries", *Nature*, 451 652-657.
- [59] COST-BENEFIT ANALYSIS FOR USING THE LI-ION BATTERIES IN LOW-VOLTAGE NETWORK FOR DECREASING THE OUTAGE TIME EXPERIENCED BY CUSTOMERS, Olli Vilppo, et al., 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, 12-15 June 2017
- [60] P. Manganiello, M. Ricco, G. Petrone, E. Monmasson and G. Spagnuolo, "Optimization of Perturbative PV MPPT Methods Through Online System Identification," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 6812-6821, Dec. 2014.
- [61] 2018 Mitsubishi Outlander PHEV Charging Time & Specs | Mitsubishi Motors [WWW]. [Viitattu 13.2.2018] Saatavissa: <https://www.mitsubishicars.com/outlander-phev/2018/specifications>
- [62] Mercedes-Benz GLC SUV Mallit [WWW]. [Viitattu 13.2.2018] Saatavissa: https://www.mercedes-benz.fi/content/finland/mpc/mpc_finland_website/fi/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/glc/x253/facts/technicaldata/models.html
- [63] 2016 Volvo XC90 T8 Plug-In Hybrid 'Twin Engine': First Drive [WWW]. [Viitattu 13.2.2018] Saatavissa: https://www.greencarreports.com/news/1096866_2016-volvo-xc90-t8-plug-in-hybrid-twin-engine-first-drive
- [64] Volkswagen Passat GTE price and specifications – EV Database [WWW]. [Viitattu 13.2.2018] Saatavissa: <https://ev-database.uk/car/1043/Volkswagen-Passat-GTE>
- [65] Amperan ominaisuudet: jokapäiväinen käyttö – Opel Suomi [WWW]. [Viitattu 8.2.2018] Saatavissa: <http://www.opel.fi/vehicles/opel-valikoima/autot/ampera/features/everyday-use.html>

- [66] Liikennekäytössä olevat hybridiautot [WWW]. [Viitattu 13.2.2018] Saatavissa: https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/hybridikayttoiset_henkilootot
- [67] Model S | Tesla Suomi [WWW]. [Viitattu 11.3.2018] Saatavissa: https://www.tesla.com/fi_FI/models
- [68] Henkilöliikennetutkimus 2010–2011, Suomalaisten liikkuminen, Liikennevirasto 2012.
- [69] Suomalaisen työmatka pitenee metrin joka työpäivä – Kantahämäläiset suhaavat kauimmaksi | Yle Uutiset | Yle.fi [WWW]. [Viitattu 13.2.2018] Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-7877400>
- [70] Elpiniki Apostolaki-Iosifidou, Paul Codani, Willett Kempton, Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging, Energy, Volume 127, 2017, Pages 730-742.

Liite 1: Vuokaavio akuston toimintaperiaatteesta



Kuva 27. Akuston yksinkertaistettu käyttöperiaate.

Liite 2: Laskennassa käytettävät oletusarvot

Taulukko 17. Järjestelmäkokonaisuuden arviointiin liittyvät oletusluvut.

Kuvaus	Arvo	Muuttuja
Ajoneuvot paikalla arkisin	Tosi	-
Ajoneuvot paikalla lauantaisin työpaikalla / kauppakeskuksessa	Epätosi / Tosi	-
Ajoneuvot paikalla sunnuntaisin työpaikalla / kauppakeskuksessa	Epätosi / Tosi	-
Latauspisteen maksimiteho (W)	22080	$P_{CP,max}$
Latauspisteen hyötysuhde	0,99	η_{CP}
Ajoneuvon maksimilatausteho (W)	30000	$P_{EV,max}$
Ajoneuvoon mahtuva energia latauksen aloitus hetkellä työpaikalla / kauppakeskuksessa (Wh)	3900 / 7640	$E_{EV,miss}$
Tarkasteltavan aurinkosähköjärjestelmä koko (W)	30000	P_{PV}
Invertterin teho (W)	30000	$P_{I,max}$
Invertterin hyötysuhde	0,962	η_I
Akuston maksimi latausteho (W)	2500	$P_{B,C,max}$
Akuston maksimi purkausteho (W)	2500	$P_{B,D,max}$
Akuston maksimi energia (Wh)	8800	$E_{B,max}$
Akuston lataushyötysuhde	0,964	$\eta_{B,C}$
Akuston purkaushyötysuhde	0,964	$\eta_{B,D}$
Verkosta otettava maksimiteho (W)	43470	$P_{Grid,max,f}$
Verkkoon syötettävä maksimiteho (W)	43470	$P_{Grid,max,t}$
Sähkön ostohinta snt/kWh	9	$c_{E,grid,f}$
Sähkön myyntihinta snt/kWh	3	$c_{E,grid,t}$

Liite 4: Kauppakeskuksen latauspisteiden käytön ajoitus

Taulukko 19. Kauppakeskuksen latausjärjestelmää käyttävien ladattavien ajoneuvojen paikalla olo.

klo	Ladattavat sähköajoneuvot paikalla								
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
0:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
0:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
0:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
1:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
1:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
1:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
2:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
2:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
2:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
3:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
3:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
3:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
4:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
4:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
4:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
5:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
5:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
5:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
6:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
6:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
6:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
7:00	108,5	0	0	0	0	0	0	0	
7:15	1	186,5	0	0	0	0	0	0	
7:30	0	1	0	0	0	0	0	0	
7:45	0	1	119	0	0	0	0	0	
8:00	0	0	1	54,5	0	0	0	0	
8:15	0	0	1	1	0	0	0	0	
8:30	86	0	0	1	0	0	0	0	
8:45	1	0	89	1	0	0	0	0	
9:00	1	66,5	1	1	0	0	0	0	
9:15	1	1	0	0	98	0	0	0	
9:30	0	1	71	0	1	0	0	0	
9:45	0	0	1	0	1	0	0	0	
10:00	179	75,5	1	0	1	0	0	0	
10:15	1	1	66,5	99,5	1	0	0	0	
10:30	0	1	1	1	1	0	0	0	
10:45	0	0	1	71	0	162,5	0	0	
11:00	0	0	59	1	96,5	1	0	0	
11:15	0	72,5	1	0	1	1	75,5	62	
11:30	60,5	1	0	191	1	0	1	1	
11:45	1	1	0	1	0	117,5	1	1	
12:00	1	1	0	1	0	1	1	1	
12:15	1	0	0	1	81,5	1	197	0	
12:30	116	0	68	1	0	0	1	83	
12:45	1	99,5	1	0	0	0	0	1	
13:00	1	1	1	72,5	0	77	0	1	
13:15	0	0	93,5	1	98	1	0	0	
13:30	0	63,5	1	0	1	1	71	0	
13:45	116	1	1	60,5	1	0	1	66,5	
14:00	1	1	1	1	0	92	1	1	
14:15	77	0	0	1	0	1	1	1	
14:30	1	0	99,5	0	89	1	1	1	
14:45	1	0	1	0	1	0	1	180,5	
15:00	1	63,5	0	0	1	93,5	0	1	
15:15	98	1	0	83	1	1	0	1	
15:30	1	0	192,5	1	59	1	0	1	
15:45	0	56	1	0	1	0	116	0	
16:00	57,5	1	1	90,5	0	0	1	158	
16:15	1	1	1	1	0	68	1	1	
16:30	1	0	0	81,5	158	0	1	1	
16:45	1	195,5	66,5	1	1	0	1	0	
17:00	116	1	1	1	1	0	0	0	
17:15	1	1	0	0	1	0	113	93,5	
17:30	1	1	0	83	1	200	1	1	
17:45	0	0	122	1	66,5	1	1	1	
18:00	0	69,5	1	0	1	1	1	0	
18:15	84,5	1	72,5	107	1	0	1	149	
18:30	1	1	1	1	0	113	1	0	
18:45	1	1	0	1	0	1	0	0	
19:00	1	0	54,5	1	0	1	0	0	
19:15	1	71	1	0	51,5	0	0	0	
19:30	1	1	0	0	1	0	0	194	
19:45	0	1	0	0	1	0	0	1	
20:00	0	1	0	0	1	105,5	0	1	
20:15	90,5	1	137,5	0	1	1	0	0	
20:30	1	1	1	0	0	1	0	0	
20:45	1	0	1	0	0	1	0	0	
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
21:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
21:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
21:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
22:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
22:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
22:45	0	0	0	0	0	0	0	0	
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	
23:15	0	0	0	0	0	0	0	0	
23:30	0	0	0	0	0	0	0	0	
23:45	0	0	0	0	0	0	0	0	

0 = Ei ajoneuvoa paikalla
 1 = Sama ajoneuvo paikalla
 ">1" = Uusi ajoneuvo paikalla
 Luku kertoo prosentteina
 ajoneuvon mahtuvan ener-
 gian suhteessa keskiarvoon